

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Diplomová práce

Využití odpadu při zpracování dřeva pro technologii sušení

Waste Utilisation at Wood Treatment for Drying Technology

Student:

Bc. Anna Koteková

Vedoucí konstrukčního cvičení:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2011

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOTEKOVÁ, A. *Využití odpadu při zpracování dřeva pro technologii sušení: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 67 s. Vedoucí práce: Vilimec, L.

Diplomová práce se zabývá návrhem kotle pro spalování dřevní štěpky. V úvodní části jsou blíže popsány vlastnosti odpadní biomasy, která vzniká z provozu pily. Dále obsahuje výpočet spotřeby tepla pro technologii sušení, vytápění výrobní haly, přípravu TUV, návrh parametrů kotle a jeho následný tepelný výpočet. Na základě tepelného výpočtu byl proveden koncepční návrh kotle a schéma jeho zapojení v systému.

ANNOTATION OF THESIS

KOTEKOVÁ, A. *Waste Utilisation at Wood Treatment for Drying Technology: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical engineering, Department of energy engineering, 2011, 67 pages, Thesis head: Vilimec, L.

Master thesis is dealing with design of boiler for combustion of wood chips. Introductory part describes properties of waste biomass, which come out of saw-mill operation. Then includes calculation of heat consumption for drying technology, heating of factory building, heating of domestic hot water, proposal of boiler parameters and following boiler heat calculation. On the basis of heat calculation is made concept design of boiler and his integration in system.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých značek a symbolů	8
1 Úvod	11
2 Dřevná biomasa – dendromasa	11
2.1 Klasifikace dřevných paliv dle ČSN P CEN/TS 14961	12
2.2 Formy dřevní biomasy	14
3 Dřevo	15
3.1 Složení dřeva	15
3.2 Vlhkost dřeva	16
3.3 Výhřevnost a stechiometrické výpočty	17
3.3.1 Spalné teplo a výhřevnost	18
3.3.2 Stechiometrické výpočty	20
4 Spotřeba tepla	22
4.1 Spotřeba tepla na přípravu TUV	22
4.2 Spotřeba tepla na vytápění výrobní haly	23
4.2.1 Tepelné ztráty obvodové stěny	23
4.2.2 Tepelné ztráty podlahy	25
4.2.3 Tepelné ztráty stropu	25
4.2.4 Tepelné ztráty oken	26
4.2.5 Tepelné ztráty vrat	26
4.2.6 Celková ztráta výrobní haly	26
4.3 Spotřeba tepla na sušení	27
4.3.1 Teplo na ohřátí vody v řezivu	28
4.3.2 Teplo na ohřev absolutně suchého dřeva a vozíku	28
4.3.3 Teplo na uvolnění volné vody	29
4.3.4 Teplo na uvolnění hygroskopicky vázané vody	29
4.3.5 Teplo na krytí tepelných ztrát sušárny	29
4.3.6 Čas sušení:	31
5 Výpočet kotle	32
5.1 Přípravné výpočty	32
5.1.1 Přepočty paliv	32
5.1.2 Stechiometrické výpočty	33
5.1.3 Entalpie vzduchu a spalin	36
5.1.4 Fyzikální charakteristiky vzduchu a spalin	39
5.2 Základní bilance kotle	42
5.2.1 Redukovaná výhřevnost	42
5.2.2 Tepelné ztráty kotle	42
5.2.2.1 Ztráta chemickým nedopalem	43
5.2.2.2 Ztráta sáláním a vedením do okolí	43
5.2.2.3 Ztráta citelným teplem spalin	43
5.2.3 Účinnost kotle	44
5.2.4 Výrobní teplo vody	44
5.2.5 Množství paliva	45
5.3 Bilanční výpočty jednotlivých ploch výměníku tepla	46
5.3.1 Bilanční výpočet pro III. tah	46
5.3.2 Bilanční výpočet pro II. tah	47
5.3.3 Bilanční výpočet pro I. tah	48
5.3.4 Teplota nechlazeného plamene	48
5.3.5 Výpočet prostupu tepla I. Tah	49
5.3.6 Výpočet prostupu tepla II. Tah	54
5.3.7 Výpočet prostupu tepla III. Tah	57
5.4 Kontrola výkonu kotle	59
5.4.1 Teplo předané v I. Tahu a komoře 1	59
5.4.2 Teplo předané v II. Tahu a komoře 2	60

5.4.3	Teplo předané v III. Tahu a komoře 3.....	61
5.4.4	Kontrola výkonu kotle.....	62
5.5	Schéma zapojení využití tepla	62
5.6	Schéma palivo/vzduch	62
5.7	Schéma na straně vody	62
6	Závěr.....	63
	Literatura.....	65
	Seznam příloh	66

Seznam použitých značek a symbolů

A	[1]	obsah popela
C	[1]	obsah uhlíku
F	[m ²]	průřez
H	[1]	obsah vodíku
H _w	[kJ/kg]	smáčecí teplo
I	[kJ/kg]	entalpie
N	[%]	obsah dusíku
M	[kg]	hmotnost
M _{pal}	[kg/s]	množství paliva přivedeného do kotle
M _{pv}	[kg/s]	výpočtové množství spáleného paliva
O	[%]	obsah kyslíku
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Q	[J]	teplo
Q	[W]	tepelný výkon
Q _i	[kJ/kg]	výhřevnost
Q _{i,red}	[kJ/kg]	redukováná výhřevnost
Q _n	[MJ/kg]	spalné teplo
Q _u	[kJ/kg]	užitečné teplo uvolněné v ohništi
Q _v	[kW]	výrobní teplo vody
S	[m ²]	plocha
T	[K]	teplota
V _{x,z}	[m _N ³ /kg]	objem spalín/vzduchu na kg paliva
V	[m ³]	objem
W	[%]	obsah vody
a	[m]	rozměr
b	[m]	rozměr
c	[m]	rozměr
c	[kJ/K/kg]	tepelná kapacita
l	[m]	tloušťka
l _v	[kJ/kg]	latentní výparné teplo
k	[W/m ² /K]	součinitel prostupu tepla
m	[kg]	hmotnost
n	[1]	počet
q _i	[W/m]	teplo sdělené 1m valcové stěny
t	[°C]	teplota

u	[kg/kg]	měrná vlhkost
w	[%]	vlhkost
w	[m/s]	rychlost
α	[1]	součinitel přebytku vzduchu
α	[W/m ² /K]	součinitel přestupu tepla
α_k	[W/m ² /K]	součinitel přestupu tepla konvekcí
α_{sal}	[W/m ² /K]	součinitel přestupu tepla sáláním
η_k	[1]	účinnost kotle
λ	[W/m/K]	součinitel tepelné vodivosti
ν	[1]	koeficient vlhkosti vzduchu
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ξ	[1]	ztráta
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
ω	[%]	percentuální zastoupení

horní indexy

a	analytický stav
d	bezvodný stav
daf	hořlavina
r	surový stav
v	vlhké
s	suché

dolní indexy

a	absolutní
CO ₂	oxid uhličitý
D	dřevo
dv	dveře
e	exteriér
H ₂ O	voda
HV	hygroskopická voda
i	interiér
k	koncový stav
N	normální podmínky
N ₂	dusík
o	okolí
obv	obvodová stěna
okn	okno

OV	ohřátá voda
p,w	vodná para
pod	podlaha
SD	suché dřevo
SDaV	suché dřevo a vozík
sk	skutečný
SO ₂	oxid siřičitý
sp	spaliny
str	strop
su	sušina
suš	sušárna
t	teoretické
TUV	teplá užitková voda
V	voda
VD	vlhké dřevo
VR	voda v řezivu
VV	volná voda
vs	vstupní
vys	výstupní
vz	vzduch
z	začáteční stav
ztr	ztráty

1 Úvod

Majitel dřevozpracující firmy je nucen měnícími podmínkami na trhu s dřevem rozšířit portfolio svého podnikání. Dřevní hmota zdražuje a trh s výrobky prvovýroby je přesycen a současně došlo k útlumu v stavební výrobě, pro kterou je sortiment pily určen.

Majitel pily chce rozšířit výrobu o výrobky s větší přidanou hodnotou. To je například výroba obkladových latí, různé zahradní altánky adt. Pro splnění záměru je nutno provozovnu rozšířit o sušárnu a zlepšení pracovních podmínek ve výrobní hale – pilnici.

Moje diplomová práce řeší komplexně tento problém. To je úprava haly pilnice, návrh sušárny a návrh zdroje tepla.

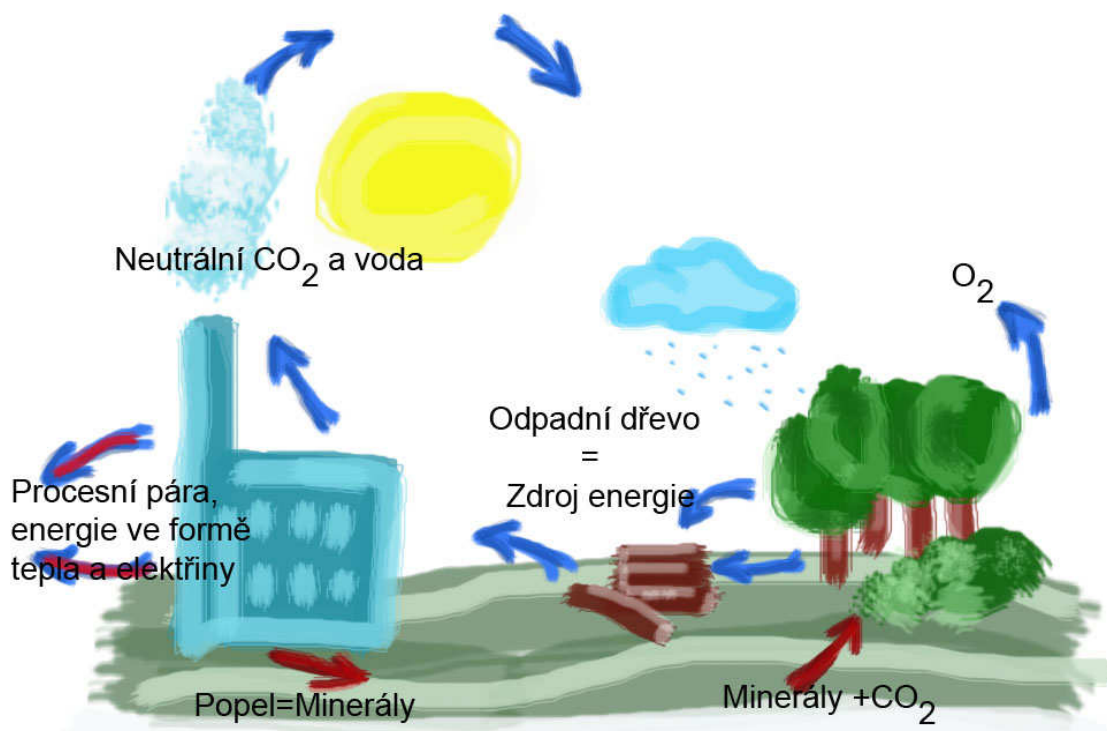
Provoz pily bude produkovat odpad různé kvality a vlhkosti. Základním odpadem jsou piliny o vlhkosti až 50% ze základního pořezu kulatiny. Výroba ze sušeného řeziva bude produkovat třísky a piliny o vlhkosti do 10%. Z uvedeného plyne, že zdroj tepla – teplovodní kotel musí umožňovat spalování dřevního odpadu o vlhkosti 10% až 50% při maximální účinnosti spalování s minimální produkcí emisí. V době nedostatku pilin a třísek bude odpadní dřevo štěpkováno pro účel výroby tepla.

Provedla jsem základní projekční výpočty spotřeby tepla v hale s návrhem nové úpravy stěn haly. Současný stav haly je nevyhovující zamýšlené změně výroby ze sušeného řeziva a je nutno tento stav změnit. Výrobní hala byla postavená s úmyslem chránit výrobní stroje před nepříznivými povětrnostními podmínkami. V zimním období hala nesplňuje základní hygienické požadavky na tepelnou pohodu.

Majitel firmy dal požadavek návrhu sušárny. Hotová sušárna s dodávkou na klíč není možná s důvodu velké finanční náročnosti. Majitel je rozhodnutý tuto investici provést svépomocí. Tato situace si vyžádala základní koncepční návrh sušárny, návrh typu sušení s výpočtem spotřeby tepla a času sušení.

2 Dřevná biomasa – dendromasa

Pod pojmem dendromasa si můžeme představit biomasu pocházející ze stromů, keřů, a křovin. Patří mezi obnovitelné zdroje energie a také se zařazuje mezi zdroje s nulovou bilancí CO₂. Co znamená, že při jejím spalování se uvolní do ovzduší také množství CO₂, jaké spotřebovaly rostliny k svému růstu (*Obr. 1.1*).



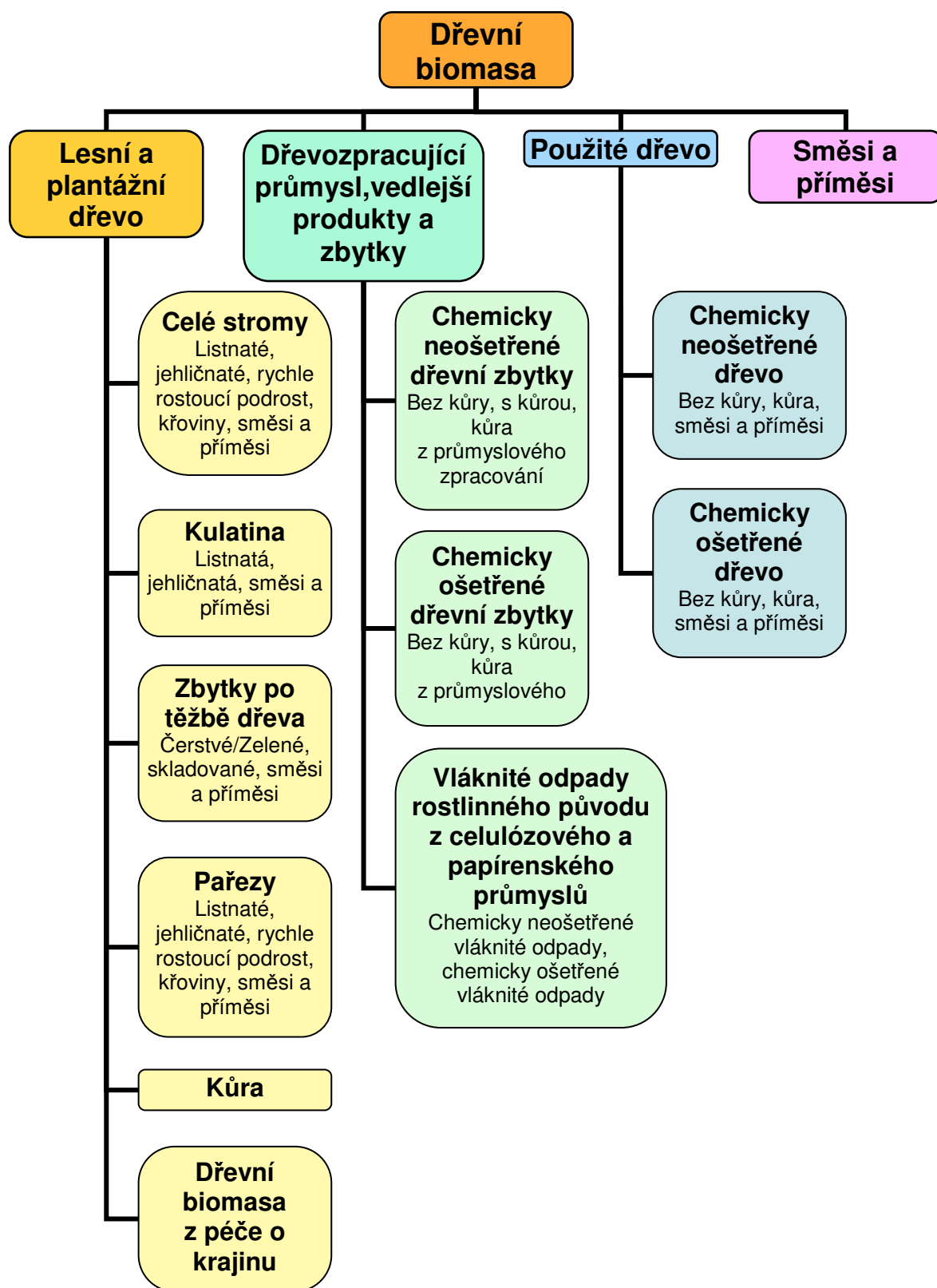
Obr.1.1 CO₂ cyklus

Jejími hlavními producenty jsou lesní hospodářství a dřevozpracující závody, které produkují dřevní odpady vhodné pro energetické využití. V současnosti se stávají jejím zdrojem i tzv. rychle rostoucí rostliny jako je vrba, topol, olše a líska.

Dřevná biomasa se využívá pro výrobu tepla resp. elektřiny. Může docházet k jejímu spalování nebo zplyňování. Při působení vysokých teplot, dochází k uvolňování hořlavé plynné látky (dřevoplyn) ze suché biomasy. K spalování dochází tehdy, je-li přítomen vzduch, dojde k hoření. V případě zahřívání bez přístupu vzduchu, dochází k zplyňování a dřevoplyn je odváděn do spalovacího prostoru, kde se spaluje obdobně jako jiná plynná paliva.

2.1 Klasifikace dřevních paliv dle ČSN P CEN/TS 14961

Klasifikace je podle předběžné české normy „Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv“ Tato technická specifikace poskytuje jednoznačnou jasnou klasifikaci principů třídění tuhých biopaliv a slouží jako nástroj pro nejefektivnější obchodování s biopalivy.



Obr.1.2 Klasifikace dřevní biomasy

Klasifikace dřevní biomasy je znázorněná na Obr.1.2. Druhá úroveň popisuje paliva z různých hlavních skupin, primárně určujících, zda je biomasa vedlejší produkt nebo průmyslový zbytek, nebo je-li to nepoužitý materiál.

2.2 Formy dřevní biomasy

Dřevní biomasa se může vyskytovat ve dvou formách, v neupravené formě nebo v tzv. zušlechtěné formě. Zušlechtění se používá při dřevních odpadech např. pilinách, které mají velký sypaný objem, což má za následek vyšší ekonomické náklady na skladovací prostory a přepravu. Zušlechtěním dochází k zmenšení objemu, tedy i nárůstu objemové hustoty a zvýšení výhřevnosti. Například zušlechtěním pilin můžeme dostat pelety nebo brikety.

Kusové dřevo (Obr.1.3a): využívá se především pro vytápění rodinných domů. Má vysoké nároky na skladovací prostory. Nejvhodnější pro spalování je po roce, kdy jeho obsah vlhkosti se pohybuje kolem 20 – 30%.

Piliny (Obr.1.3b): vznikají jako vedlejší produkt zpracování dřeva řeznými nástroji. Používají se pro výrobu pelet a briket.

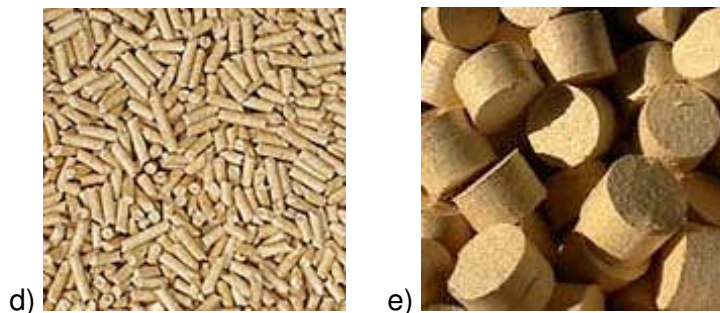
Lesní štěpka (Obr.1.3c): vyrábí se z odpadního dřeva. Délka štěpky se pohybuje v rozmezí 5 až 50mm a tloušťka od 5 do 15mm. Dělí se:

- zelená lesní štěpka – obsahuje dřevo, kůru, asimilační orgány
- hnědá lesní štěpka – obsahuje dřevo, kůru
- bílá lesní štěpka – obsahuje dřevo

Pelety (Obr.1.3d): vyrábějí se z dřevního odpadu lisováním za vysokých teplot. Jde o granule o průměru 6 až 20mm a do délky 40mm.

Brikety (Obr.1.3e): vyrábějí se jako pelety.





Obr.1.3 a) kusové dřevo, b) piliny, c) štěpka, d) pelety, e) brikety

Při navrhování skladovacích prostorů, objemové spotřeby paliva a atd. se používají následující vyjádření 1m^3 :

- 1plm – plnometr, objem $1\times 1\times 1\text{m}$ vyplněn jenom dřevní hmotou, bez mezer
- 1prm – prostorový metr, objem $1\times 1\times 1\text{m}$ vyplněn dřevem a mezerami
- 1mprsm – sypný metr, objem $1\times 1\times 1\text{m}$ volně sypaného (nezhutněného) drobného dřeva, štěpky, pilin, pelet

Použitá literatura [3], [7], [8], [12], [13]

3 Dřevo

3.1 Složení dřeva

Chemické složení dřeva nemůže být precizně definované pro určitou třídu stromů nebo konkrétní strom. Chemické složení se liší s částmi stromu (kořen, kmen, větve), typem dřeva, geografickou polohou, klímou a půdou.

Suché dřevo je primárně složené z celulózy, hemicelulózy, ligninu a menšího množství (5% až 10%) vedlejších látek. Celulóza představuje přibližně 50% dřevní hmoty, lignin 23% až 33% v měkkém dřevě a 16% až 25% v tvrdém dřevě.

Vedlejší látky se taky nazývají extrakční, protože je možné extrahovat je z dřeva pomocí rozpouštědla (voda, alkohol, aceton, a jiné). Jsou to organické složeniny zahrnující tanín a jiné polyfenoly, esenciální oleje, tuky živice, vosky, saponin, alkaloidy, proteiny, atd. Přispívají k vlastnostem dřeva, jako je barva, vůně a odolnost. Neorganické vedlejší látky tvoří 0,25% až 1% dřevní hmoty (vápník, draslík, magnézium) Mezi stopové prvky patří fosfor, sodík, železo, mangan, měď, zinek atd.

Tuhé palivo se skládá z hořlaviny, popeloviny A a vody W. Obecné můžeme složení paliva vyjádřit vztahem [10]:

$$h + A + W = 1 \quad (3.1)$$

Chemické složení dřevní hmoty v suchém stavu se pohybuje okolo C= 50%, H= 6,2%, O= 43,6% a N= 0,2% [9]. Složení různých druhů dřevní hmoty je v *Tab. 3.1.*, kde je pro porovnání také uvedeno složení hnědého uhlí.

Tab. 3.1 Chemické složení dřevní hmoty [3]

Složka	Dřevo			Kůra	Hnědé uhlí
	Jehličnaté [%]	Listnaté [%]	Smíšené [%]	[%]	[%]
Uhlík (C)	51,2	50,0	50,5	51,4	69,5
Vodík (H)	6,2	6,15	6,2	6,1	5,5
Kyslík (O)	42,2	43,25	42,7	42,2	23,0
Síra (S)	-	-	-	-	1,0

Dřevo obsahuje velký podíl prchavé hořlaviny 70-85%, tj. hořlaviny, která se uvolňuje v plynné formě při ohřátí paliva. Teplota počátku uvolňování prchavé hořlaviny se u dřeva pohybuje v rozmezí 150-160 °C.

Obsah popelovin v dřevě je 0,5-2%. Charakteristické teploty popelovin u dřevního odpadu jsou přibližně:

- teplota měknutí 1000 °C
- teplota tavení 1200 °C
- teplota tečení 1250 °C

3.2 Vlhkost dřeva

Obsah vody ovlivňuje výhřevnost dřeva, měrnou hmotnost, transport dřeva a spalovací proces na roštu. Množství vody se pohybuje od 8-60% v závislosti, či je dřevo surová lesní hmota nebo uměle sušené. Z hlediska vlhkosti dřeva rozeznáváme:

- surové dřevo – dřevo čerstvě skácené
- mokré dřevo – dřevo s vlhkostí nad mezí nasycení buňkových stěn
- vlhké dřevo – dřevo s vlhkostí do meze nasycení buňkových stěn
- předsušené dřevo – dřevo předsušené přirozeně nebo uměle na vlhkost 15-30%

Vlhkost paliva je možné určit dvěma metodami. Prvá metodou je použití elektrického vlhkoměru, který pracuje na základě změny elektrických vlastností na množství obsažené

vody. Druhá metoda je váhová zkouška dle ČSN 49 0103 založená na porovnání hmotností vzorků v počátečním stavu (M_{VD}) a po vysušení při teplotě 100-105 °C (M_{SD}).

V technologii zpracování dřeva se obsah vody v dřevě vyjadřuje pomocí **absolutní vlhkosti dřeva**, která je dána podílem hmotnosti vody k hmotnosti úplně suchého dřeva [1]:

$$w_a = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{SD}} \cdot 100 = \frac{M_V}{M_{SD}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

V energetické praxi, při obchodním styku, výpočte výhřevnosti se používá **relativní vlhkost dřeva**, která je dána podílem hmotnosti vody k hmotnosti vlhkého dřeva [1]:

$$w = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{VD}} \cdot 100 = \frac{M_V}{M_{VD}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

Ve výpočtech tepelně-technických se používá **měrná vlhkost dřeva** [1]:

$$u = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{SD}} = \frac{M_V}{M_{SD}} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.4)$$

3.3 Výhřevnost a stechiometrické výpočty

Před samotným výpočtem je nutné si ujasnit jednotlivé označování stavů, a přepočty mezi stavy, které jsou potřebné pro samotný výpočet výhřevnosti.

Označování stavů:

- r surový stav (původní stav paliva), s daným obsahem vlhkosti a popela, v kterém se palivo těží, dodává a spotřebovává ($h+W+A$)
- d sušina, stav paliva bez obsahu vody, bezvodý ($h+A$)
- daf hořlavina, stav paliva bez vody a popela (h)
- a stav analytický

Přepočty mezi stavy, složky dosazujeme v hmotnostních procentech [10]:

$$X^r = X^d \cdot \frac{100 - W^r}{100} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.5)$$

$$X^r = X^a \cdot \frac{100 - W^r}{100 - W^a} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.6)$$

$$X^r = X^{daf} \cdot \frac{100 - W^r - A^r}{100} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.7)$$

$$X^{daf} = X^d \cdot \frac{100 - A^d}{100} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.8)$$

3.3.1 Spalné teplo a výhřevnost

V případě, že máme k dispozici prvkové složení dřeva, můžeme spalné teplo vypočítat pomocí empirických vzorců pro výpočet spalného tepla. Dosazujeme v hmotnostních procentech.

- spalné teplo hořlaviny (Dugong – Boile) [6]:

$$Q_n^{daf} = 0,352 \cdot C^{daf} + 1,162 \cdot H^{daf} - 0,111 \cdot O^{daf} \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.9)$$

- spalné teplo bezvodého paliva (Institute of Gas Technology) [6]:

$$Q_n^d = 0,341 \cdot C^d + 1,320 \cdot H^d - 0,120 \cdot (O^d + N^d) + 0,0685 - 0,0153 \cdot A^d \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.10)$$

- spalné teplo hořlaviny (Vondráčkův vzorec) [6]:

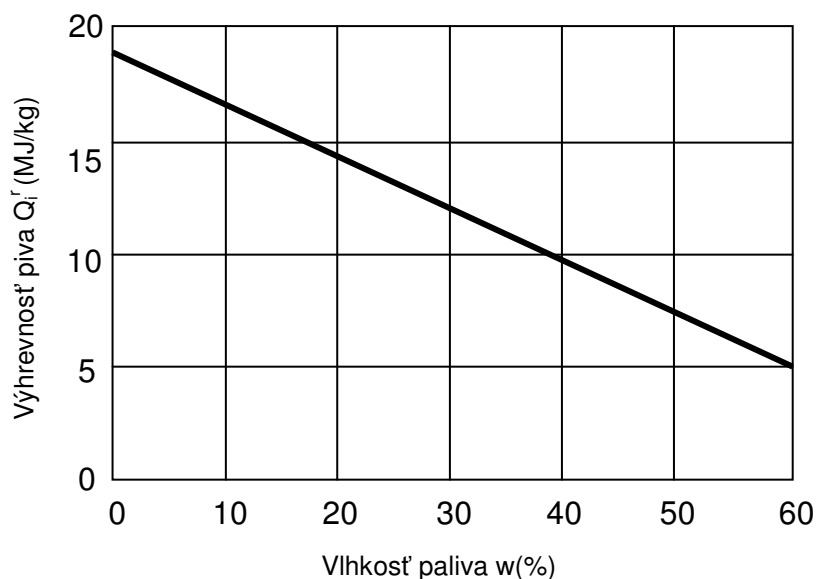
$$Q_n^{daf} = ((89,1 - 0,062 \cdot C^{daf}) \cdot C^{daf} + 270 \cdot (H^{daf} - O^{daf} / 10) + 25 \cdot S^{daf}) \cdot 4,1868 \cdot 10^{-3} \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.11)$$

V tabulce *Tab. 3.2.* jsou uvedené spalné tepla smrku, jedle a borovice, pro absolutně suchou hmotu.

Tab. 3.2 Spalné teplo sušiny dřeva a kůry [3]

Dřevina	Palivo	Spalné teplo [MJ/kg]
Smrk obyčejný	dřevo	20,1 – 20,6
	kůra	20,2 – 20,5
Jedle bílá	dřevo	20,4
	kůra	20,3
Borovice lesná	dřevo	21,3
	kůra	21,3

Výhřevnost dřevní hmoty je závislá na momentálním množství vlhkosti v palivu. Její velikost se pohybuje v rozmezí 5-20MJ/kg (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Závislost výhřevnosti na obsahu vlhkosti v palivu

Na výpočet výhřevnosti můžeme použít několik vztahů, empirický vztah, nebo použít přepočty ze spalného tepla:

Statistický vzorec [10]:

$$Q_i^r = 34,75 \cdot C^r + 95,3 \cdot H^r - 10,9 \cdot (O^r - S^r) - 2,5 \cdot W^r \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.12)$$

Z rovnice dle ČSN EN13229, dosazujeme v hmot. procentech [5]:

$$Q_i^r = \frac{18,5 \cdot (100 - W^r) - 2,44 \cdot W^r}{100} \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.13)$$

Nebo použít přepočet ze spalného tepla hořlaviny [6]:

$$Q_n^r = Q_n^{daf} \cdot \frac{100 - W^r - A^r}{100} = Q_n^d \cdot \frac{100 - W^r}{100} \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.14)$$

$$Q_i^r = Q_n^r - 0,02442 \cdot (W^r + 8,94 \cdot H^r) \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.15)$$

Další možností je výpočet výhřevnosti ze spalného tepla sušiny [6]:

$$Q_n^d = Q_n^{daf} \cdot \frac{100 - A^d}{100} \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.16)$$

$$Q_i^d = Q_n^d - 0,02442 \cdot 8,94 \cdot H^d \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad (3.17)$$

$$Q_i^r = Q_i^d \cdot \frac{100 - W^r}{100} - 0,02442 \cdot W^r \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.18)$$

Příklad výhřevnosti jednotlivých částí stromu pro smrk a borovici pro absolutně suchou dendromasu jsou uvedeny v *Tab. 3.3.*

Tab. 3.3 Výhřevnost jednotlivých částí stromů [3]

Část dřevní hmoty	Výhřevnost [MJ/kg]	
	Borovice	Smrk
Kmenové dřevo	19,2	19,0
Kůra z kmene	19,4	19,8
Větve bez zeleně	20,2	19,8
Jehličí	21,1	19,8

3.3.2 Stechiometrické výpočty

Vzorce pro objemové spalování tuhých paliv:

- *teoretické množství kyslíku:*

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22}{32} \cdot O \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (3.19)$$

- *množství teoretického vzduchu:*

$$V_{vz,t} = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t} \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (3.20)$$

- *množství teoretického vlhkého vzduchu:*

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t} \cdot v \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (3.21)$$

- *množství teoretických suchých spalín*

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{28} \cdot N + \frac{22,4}{32} \cdot S + 0,79 \cdot V_{vz,t} \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (3.22)$$

- *množství vodní páry v spalínách:*

$$V_{H_2O,t} = \frac{22,4}{2} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot w + (v - 1) \cdot V_{vz,t} \quad [\text{m}_N^3/\text{kg}] \quad (3.23)$$

- *množství spalin vlhkých teoretických:*

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O,t} \quad [m_N^3/kg] \quad (3.24)$$

- *množství skutečného vzduchu suchého:*

$$V_{vz,sk}^s = \alpha \cdot V_{vz,t} \quad [m_N^3/kg] \quad (3.25)$$

- *množství skutečného vzduchu vlhkého:*

$$V_{vz,sk}^s = \nu \cdot V_{vz,sk}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (3.26)$$

- *množství skutečných suchých spalin:*

$$V_{sp,s}^s = V_{sp,t}^s + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t} \quad [m_N^3/kg] \quad (3.27)$$

- *množství skutečných vlhkých spalin:*

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,t}^v + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^v \quad [m_N^3/kg] \quad (3.28)$$

- *složení vlhkých spalin:*

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C \quad [m_N^3/kg] \quad (3.29)$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S \quad [m_N^3/kg] \quad (3.30)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (3.31)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t} \quad [m_N^3/kg] \quad (3.32)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot w + \alpha \cdot (\nu - 1) \cdot V_{vz,t} \quad [m_N^3/kg] \quad (3.33)$$

- *percentuální složení vlhkých spalin*

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.34)$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,s}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.35)$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,s}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.36)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,s}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.37)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,s}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.38)$$

Použitá literatura [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [9], [10]

4 Spotřeba tepla

Provoz na zpracování dřeva se nachází v okrese Čadca. Zpracovává surové smrkové dřevo polotovary určený pro stavbu krovů, přičemž hrubý řezný výkon pily je 8m³ kulatiny na 1 směnu. Využití kulatiny je cca 70%. Vzniknutý odpad je 2,4m³, z čeho piliny jsou 0,8m³ a dřevo 1,6m³.

Odpad se bude používat pro výrobu tepla pro technologií sušení, vytápění výrobní haly a přípravu TUV.

4.1 Spotřeba tepla na přípravu TUV

Na pile pracují 3 zaměstnanci. Uvažuje se, že potřeba TUV na osobu je 50l, voda se má ohřát z 10 °C na 50 °C. Dále se předpokládá, že doba pro přípravu teple vody činí dobu trvání pracovní směny, čili 8 hodin. Potřebné teplo pro přípravu TUV vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$Q_{TUV} = \frac{n \cdot m \cdot c \cdot (t_{vys} - t_{vs})}{\tau} \quad [W] \quad (4.1)$$

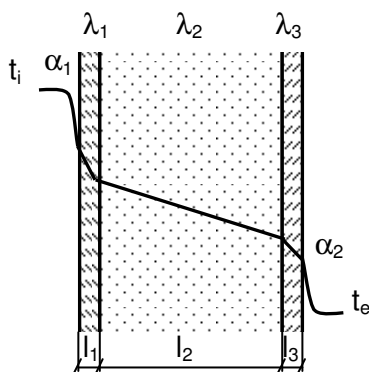
$$Q_{TUV} = \frac{3 \cdot 50 \cdot 4180 \cdot (50 - 10)}{8 \cdot 3600} \cdot \frac{1}{1000} = 0,871 kW$$

4.2 Spotřeba tepla na vytápění výrobní haly

Výpočet tepla pro krytí tepelných ztrát, je proveden pro halu po rekonstrukci, kterou majitel plánuje v budoucnu zrealizovat.

Rozměry zůstanou zachovány 12x14x3,6m. Obvodová stěna bude tvořena vrstvami plynosilikátu, polystyrénu a omítky. Do obvodových stěn se zabuduje 7 oken a vrata. Podlaha zůstane nezměněná, to je betonová deska. Strop bude tvořen deskovým podbitím, a zaizolován vrstvou suchých pilin.

Vztahy pro výpočet přestupu tepla:



Tepelné ztráty [11]:

$$Q_{ztr} = k \cdot S \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

Součinitel prostupu tepla [11]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (4.3)$$

4.2.1 Tepelné ztráty obvodové stěny

Objekt se nachází v okrese Čadca, pro který je vnější výpočtová teplota -15°C, počet vytápěcích dní 239, průměrná teplota ve vytápěcím období 2,9°C. Hala se bude vytápět na 15°C.

Součinitele přestupu tepla, a tepelné vodivosti jsou brány ze stránek www.tzb-info.cz, ze sekce Tabulky a výpočty/Prostup tepla vícevrstvou konstrukcí a průběh teplot v konstrukci.

Vstupní hodnoty

Složení	l	λ
	m	$W \cdot ^{-1} \cdot K^{-1}$
Plynosilikát	0,200	0,200
Polystyrén	0,060	0,040
Omítka	0,005	0,990

Součinitel prostupu tepla pro obvodovou stěnu dle vztahu (4.3):

$$k_{obv} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k_{obv} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{0,200}{0,200} + \frac{0,060}{0,040} + \frac{0,005}{0,990} + \frac{1}{25}} = 0,358 W / (m^2 \cdot K)$$

Výpočtová plocha:

$$S_{obv} = S_{obv,c} - S_{okn} - S_{dv}$$

$$S_{obv,c} = 2 \cdot (a + b) \cdot c = 2 \cdot (12 + 14) \cdot 3,6 = 187,20 m^2$$

$$S_{okn} = n_1 \cdot \check{s}_{okno1} \cdot v_{okno1} + n_2 \cdot \check{s}_{okno2} \cdot v_{okno2} = 4 \cdot 1,5 \cdot 1,8 + 3 \cdot 1,5 \cdot 1,5 = 17,55 m^2$$

$$S_{dv} = \check{s}_{dveřv} \cdot v_{dveř} = 3 \cdot 3 = 9 m^2$$

$$S_{obv} = 187,2 - 17,55 - 9 = 160,65 m^2$$

Tepelná ztráta obvodové stěny dle vztahu (4.2):

$$Q_{obvr} = k_{obv} \cdot S_{obv} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{obv} = 0,358 \cdot 160,65 \cdot (15 - (-15)) = 1724,3 W$$

4.2.2 Tepelné ztráty podlahy

Vstupní hodnoty

Složení	l	λ
	m	$W \cdot ^{-1} \cdot K^{-1}$
Beton	0,100	1,580

Součinitel prostupu tepla pro podlahu dle vztahu (4.3):

$$k_{pod} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1}}$$

$$k_{pod} = \frac{1}{\frac{1}{5,882} + \frac{0,100}{1,580}} = 4,286 W / (m^2 \cdot K)$$

Výpočtová plocha:

$$S_{pod} = a \cdot b = 12 \cdot 14 = 168 m^2$$

Tepelná ztráta podlahy dle vztahu (4.2):

$$Q_{pod} = k_{pod} \cdot S_{pod} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{pod} = 4,286 \cdot 168 \cdot (15 - 4) = 7921,4 W$$

4.2.3 Tepelné ztráty stropu

Vstupní hodnoty

Složení	l	λ
	m	$W \cdot ^{-1} \cdot K^{-1}$
Deska	0,022	0,180
Přiliny	0,250	0,120

Součinitel prostupu tepla strop dle vztahu (4.3):

$$k_{str} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k_{str} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,022}{0,180} + \frac{0,250}{0,120} + \frac{1}{17}} = 0,423 W / (m^2 \cdot K)$$

Výpočtová plocha:

$$S_{str} = a \cdot b = 12 \cdot 14 = 168 m^2$$

Tepelná ztráta stropu dle vztahu (3.2):

$$Q_{str} = k_{str} \cdot S_{str} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{str} = 0,423 \cdot 168 \cdot (15 - (-14)) = 2060,6 W$$

4.2.4 Tepelné ztráty oken

Budova bude mít 7 oken, z kterých 4 mají rozměr 1,5x1,8m a zbylá tři mají rozměr 1,5x1,5m. Předpokládaný součinitel prostupu tepla $k_{okn}=2,4 W/(m^2 \cdot K)$

Tepelná ztráta oken dle vztahu (4.2):

$$Q_{okn} = k_{okn} \cdot S_{okn} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{okn} = 2,4 \cdot 17,55 \cdot (15 - (-15)) = 1263,6 W$$

4.2.5 Tepelná ztráty vrat

Velikost vrat je 3x3m. Předpokládaný součinitel prostupu tepla $k_{dv}=5,4 W/(m^2 \cdot K)$

Tepelná ztráta vrat dle vztahu (4.2):

$$Q_{okn} = k_{okn} \cdot S_{okn} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{dv} = 5,4 \cdot 9 \cdot (15 - (-15)) = 1458 W$$

4.2.6 Celková ztráta výrobní haly

Celkovou tepelnou ztrátu budovy dostaneme jako součet dílčích ztrát:

$$Q_{ztr, hala} = Q_{obv} + Q_{pod} + Q_{str} + Q_{okn} + Q_{dv}$$

$$Q_{ztr, hala} = 1724,3 + 7921 + 2060,6 + 1263,6 + 1458 = 14427,9W = 14,43kW$$

4.3 Spotřeba tepla na sušení

Několik poznámek k procesu sušení dřeva:

- proces sušení můžeme rozdělit do tří časových úseků. V prvním dochází k ohřevu materiálu, vlhkost se mění jen málo. V druhém úseku dochází k odpařování volné vody z dřeva a v třetím dochází k odstraňování vázané vody
- vzhledem na teplotu sušení rozeznáváme teplovzdušné sušení a vysokoteplotní. Teplovzdušné se pak ještě dělí na nízkoteplotní kde $t_s=40^\circ\text{C}$ a klasické $t_s=40-100^\circ\text{C}$. Vysokoteplotní probíhá při teplotách $t_s=100-130^\circ\text{C}$.

Doporučuji teplovzdušné sušení klasické s teplotou sušicího prostředí $t_s=80^\circ\text{C}$. Je relativně časové nenáročné v porovnání s nízkoteplotním sušením a poskytuje dobrou jakost sušeného dřeva pro další zpracování.

Pro sušárnu byl vytvořen koncepční návrh, který je uveden v Příloze H. V sušárně bude možné sušit 5m^3 řeziva, jako topné tělesa jsou zde voleny kalorifery.

Teplo přivedené do sušárny bude použito na:

- ohřev vody v řezivu Q_{VR}
- ohřev absolutně suchého dřeva a vozíku Q_{SDaV}
- uvolnění volné vody Q_{VV}
- uvolnění hygroskopicky vázané vody Q_{HV}
- pokrytí tepelných ztrát do okolí $Q_{ztr, suš}$

Pak můžeme přivedené teplo vyjádřit:

$$Q_T = Q_{VR} + Q_{SDaV} + Q_{VV} + Q_{HV} + Q_{ztr, suš} \quad [\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})] \quad (4.4)$$

Do výpočtu není započítáno teplo potřebné pro ohřev konstrukce sušárny z důvodu nepřetržitého provozu sušárny.

4.3.1 Teplo na ohřátí vody v řezivu

V případě ohřívání vody v řezivu neuvažujeme o rozmrazování dřeva, z toho důvodu, že dřevo před samotným řezáním je v zimním období dočasně uskladněno ve výrobní hale, aby rozmrzlo a zabránilo se tak praskání pilových pásu.

V sušárně se bude sušit 5m^3 dřeva s počáteční relativní vlhkostí 60% na konečných 8%. Voda v řezivu se bude ohřívát z teploty 0°C na 76°C .

- hmotnost vlhkého dřeva:

$$M_{VD} = \rho_{VD} \cdot V = 800 \cdot 5 = 4000\text{kg}$$

- hmotnost suchého dřeva:

$$M_{SD} = M_{VD} - M_{VD} \cdot w_{r,z} = 4000 - 4000 \cdot 0,6 = 1600\text{kg}$$

- počáteční a koncová měrná vlhkost dle (3.4):

$$u_z = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{SD}} = \frac{4000 - 1600}{1600} = 1,5$$

$$u_z = \frac{M_{VD} \cdot w_{r,k}}{M_{SD}} = \frac{4000 \cdot 0,08}{1600} = 0,2$$

- hmotnost vody [1]:

$$M_{OV} = M_{SD} \cdot (u_z - u_k) = 1600 \cdot (1,5 - 0,2) = 2080\text{kg} \quad [\text{kg}] \quad (4.5)$$

- teplo na ohřev vody v řezivu [1]:

$$Q_{VR} = M_{OV} \cdot c_W \cdot (u_k \cdot t_D - u_z \cdot t_0) \quad [\text{kJ}] \quad (4.6)$$

$$Q_{VR} = 2080 \cdot 4,180 \cdot (0,2 \cdot 76 - 1,5 \cdot 0) = 132154,9\text{kJ}$$

4.3.2 Teplo na ohřev absolutně suchého dřeva a vozíku

Dřevo v sušárně bude uloženo na ocelovém vozíku o hmotnosti 770kg. Měrná tepelná kapacita ocele je $c_{VOZ}=0,44\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. S ohřevem vozíku je nutno počítat z důvodu vychladnutí v době výkladky suchého a nákladky mokrého dřeva.

$$Q_{SDsV} = M_{VOZ} \cdot c_{VOZ} \cdot (t_D - t_0) + M_{SD} \cdot c_{SD} \cdot (t_D - t_0) \quad [\text{kJ}] \quad (4.7)$$

$$Q_{SDaV} = 770 \cdot 0,44 \cdot (76 - 0) + 1600 \cdot 1,45 \cdot (76 - 0) = 202068,8 kJ$$

4.3.3 Teplo na uvolnění volné vody

Střední hodnota hranice kdy se uvažuje o hygroskopické vázané vodě je 30% absolutní vlhkosti, čemu odpovídá 23,08% relativní vlhkosti.

$$Q_{VV} = I_V \cdot M_{V23,08-60} = I_V \cdot M_{VD} \cdot (w_{z,r} - w_{MH,r}) \quad [kJ] \quad (4.8)$$

$$Q_{VV} = 2405 \cdot 4000 \cdot \frac{(60 - 23,08)}{100} = 3552000 kJ$$

4.3.4 Teplo na uvolnění hygroskopicky vázané vody

H_W je smáčecí teplo na uvolnění hygroskopicky vázané vlhkosti, podle Katza a Kollmana pro 1kg úplně suchého dřeva je [1]:

$$H_W = 74,68 - \frac{92,11 \cdot u_k}{0,07 + u_k} \quad [kJ/kg] \quad (4.9)$$

$$H_W = 74,68 - \frac{92,11 \cdot 0,2}{0,07 + 0,2} = 6,450 kJ$$

Teplo na uvolnění hygroskopicky vázané vody [1]:

$$Q_{HV} = M_{SD} \cdot H_W \quad [kJ] \quad (4.10)$$

$$Q_{HV} = 1600 \cdot 6,450 = 10320,6 kJ$$

4.3.5 Teplo na krytí tepelných ztrát sušárny

Steny a strop sušárny jsou tvořené deskou, sklenou vatou a deskou. Podlahu tvoří betonová deska o tloušťce 100 mm. Pozinkovaný plech a parozábranu nebereme při výpočtu v úvahu. Rozměry sušárny jsou 2x6x2,2m

Vstupní hodnoty pro obvodovou stěnu a strop

Složení	l	λ
	m	$W \cdot ^{-1} \cdot K^{-1}$
Deska	0,025	0,180
Skelná vata	0,200	0,050
Deska	0,025	0,180

Součinitel prostupu tepla pro obvodovou stěnu a strop dle vztahu (4.3):

$$k_{obv,s} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k_{obv,s} = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0,025}{0,180} + \frac{0,200}{0,050} + \frac{0,025}{0,180} + \frac{1}{25}} = 0,229 W / (m^2 \cdot K)$$

Výpočtová plocha:

$$S_{obv,s} = 2 \cdot (a + b) \cdot c + a \cdot b = 2 \cdot (2 + 6) \cdot 2,2 + 2 \cdot 6 = 47,2 m^2$$

Tepelná ztráta obvodové stěny a stropu dle vztahu (4.2):

$$Q_{obd,s} = k_{obd,s} \cdot S_{obv,s} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{obv,s} = 0,229 \cdot 47,2 \cdot (80 - (-15)) = 1026,8 W$$

Vstupní hodnoty pro podlahu

Složení	l	λ
	m	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Beton	0,100	1,580

Součinitel prostupu tepla pro podlahu dle vztahu (4.3):

$$k_{pod,s} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1}}$$

$$k_{pod,s} = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0,100}{1,580}} = 9,681 W / (m^2 \cdot K)$$

Výpočtová plocha:

$$S_{pod,s} = a \cdot b = 2 \cdot 6 = 12m^2$$

Tepelná ztráta podlahy dle vztahu (4.2):

$$Q_{pod,s} = k_{pod,s} \cdot S_{pod,s} \cdot (t_i - t_e)$$

$$Q_{pod,s} = 9,681 \cdot 12 \cdot (80 - 4) = 8829,4W$$

Celková tepelná ztráta

$$Q_{ztr,suš} = Q_{obv,s} + Q_{pod,s} = 1026,8 + 8829,4 = 9856,2W = 9,9kW$$

4.3.6 Čas sušení:

Čas sušení se skládá z času na ohřev a času vlastního sušení.

Čas ohřevu dle literatury [1] je doporučen minimálně 1h na cm tloušťky řeziva. Pro desku o tloušťce 25 mm je čas ohřevu 2,5 hod. Pro daný čas ohřevu je vypočítaný minimální tepelný příkon 37,1 kW pro ohřev desek a vozíku. V zimním období z důvodu energetické náročnosti pilnice je čas prodloužen. Na základě uvedené skutečnosti byl zvolený čas ohřevu 5 hodin. Pro prodloužený čas ohřevu je potřebný výkon jenom 18,6kW.

Čas vlastního sušení, který skládá z času pro uvolnění volné vody a hygroskopicky vázané vody je pro desku o tloušťce 25mm o počáteční vlhkosti 60% je 32,75 hodin [1]. Pro vlastní sušení je potřebný příkon 30,2kW.

Varianta sušení desky tloušťky 25 mm je vzata do výpočtu jako největší energetická náročnost. U hranolu a fošen nároky na energii sušení klesají a prodlužuje se čas sušení.

Použitá literatura [1], [4], [11], [14]

5 Výpočet kotle

5.1 Přípravné výpočty

Pro určení výhřevnosti je potřebné znát obsah vlhkosti v palivu. Proto byl odebrán vzorek paliva a určen obsah vody pomocí vlhkostního analyzátoru. Vzorek byl sušen při teplotě 105 °C, po dobu 240min. Byly zjištěny hmotnosti M_{VD} a M_{SD} , které byli následně doplněny do vztahů (3.2)-(3.4):

$$M_{VD} = 9,050g$$

$$M_{SD} = 4,199g$$

- absolutní vlhkost:

$$w_a = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{SD}} \cdot 100 = \frac{9,050 - 4,199}{4,199} \cdot 100 = 115,53\%$$

- relativní vlhkost:

$$w = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{VD}} \cdot 100 = \frac{9,050 - 4,199}{9,050} \cdot 100 = 53,60\%$$

- měrná vlhkost:

$$u = \frac{M_{VD} - M_{SD}}{M_{SD}} = \frac{9,050 - 4,199}{4,199} = 1,155kg / kg$$

5.1.1 Přepočty paliv

Výpočet spalování je uveden pro složení smrkového dřeva s kůrou v suchém stavu [3]: $C^d = 49,8\%$, $H_2^d = 6,3\%$, $O_2^d = 43,2\%$, $N_2^d = 0,13\%$, $A^d = 0,555\%$, $S^d = 0,015\%$, a obsah vody $w_r=53,6\%$. Spalování probíhá při přebytku vzduchu $\alpha=2$.

Propočet na surový stav dle vztahu (3.5):

$$X^r = X^d \cdot \frac{100 - W^r}{100}$$

$$C^r = 49,8 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,2311 \text{ kg / kg}$$

$$H^r = 6,3 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,0292 \text{ kg / kg}$$

$$S^r = 0,015 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,0001 \text{ kg / kg}$$

$$N^r = 0,13 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,0006 \text{ kg / kg}$$

$$O^r = 43,2 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,2004 \text{ kg / kg}$$

$$A^r = 0,56 \cdot \frac{100 - 53,60}{100} = 0,0026 \text{ kg / kg}$$

Výhřevnost vypočítáme dle vztahu (3.12):

$$Q_i^r = 34,75 \cdot C^r + 95,3 \cdot H^r - 10,9 \cdot (O^r - S^r) - 2,5 \cdot W^r$$

$$Q_i^r = 34,75 \cdot 0,2311 + 95,3 \cdot 0,0292 - 10,9 \cdot (0,2004 - 0,0001) - 2,5 \cdot 0,5360 = 7,291 \text{ MJ / kg}$$

5.1.2 Stechiometrické výpočty

Stechiometrie výpočet dle vztahů (3.19)-(3.37):

- součinitel zvětšení objem spalín vzdušnou vlhkostí v přivedeném spalovacím vzduchu [10]:

$$\nu = 1 + \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_c - \varphi \cdot p_p''} \quad [\text{kJ}] \quad (5.1)$$

φ relativní vlhkost vzduchu

p_p'' ... parciální tlak na vodní páry na mezi sytosti

p_c celkový tlak vlhkého vzduchu

$$\nu = 1 + \frac{0,8 \cdot 2336,8}{100000 - 0,8 \cdot 2336,8} = 1,019$$

- *teoretické množství kyslíku:*

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,2311 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,0292 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0001 - \frac{22}{32} \cdot 0,002004 = 0,455 m_N^3 / kg$$

- *množství teoretického vzduchu:*

$$V_{vz,t} = \frac{1}{0,21} \cdot 0,455 = 2,166 m_N^3 / kg$$

- *množství teoretického vlhkého vzduchu:*

$$V_{vz,t}^v = 2,166 \cdot 1,019 = 2,207 m_N^3 / kg$$

- *množství teoretických suchých spalín*

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot 0,2311 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0006 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0001 + 0,79 \cdot 2,166 = 2,143 m_N^3 / kg$$

- *množství vodní páry v spalínách:*

$$V_{H_2O,t} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0292 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,5360 + (1,019 - 1) \cdot 2,166 = 1,035 m_N^3 / kg$$

- *množství spalín vlhkých teoretických:*

$$V_{sp,t}^v = 2,143 + 1,035 = 3,178 m_N^3 / kg$$

- *množství skutečného vzduchu suchého:*

$$V_{vz,sk}^s = 2 \cdot 2,166 = 4,331 m_N^3 / kg$$

- *množství skutečného vzduchu vlhkého:*

$$V_{vz,sk}^v = 1,019 \cdot 4,331 = 4,414 m_N^3 / kg$$

- *množství skutečných suchých spalín:*

$$V_{sp,s}^s = 2,143 + (2 - 1) \cdot 2,166 = 4,308 m_N^3 / kg$$

- *množství skutečných vlhkých spalín:*

$$V_{sp,s}^v = 3,178 + (2 - 1) \cdot 2,207 = 5,385 m_N^3 / kg$$

- *složení vlhkých spalín:*

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,2311 = 0,431 m_N^3 / kg$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 0,0001 = 0,000 m_N^3 / kg$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,0006 + 0,79 \cdot 4,331 = 3,422 m_N^3 / kg$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (2 - 1) \cdot 2,166 = 0,455 m_N^3 / kg$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0292 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,5360 + 2 \cdot (1,1019 - 1) \cdot 2,166 = 1,077 m_N^3 / kg$$

- *percentuální složení vlhkých spalín*

$$\omega_{CO_2} = \frac{0,431}{5,385} \cdot 100 = 8,01\%$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{0,000}{5,385} \cdot 100 = 0,00\%$$

$$\omega_{N_2} = \frac{3,422}{5,385} \cdot 100 = 63,55\%$$

$$\omega_{O_2} = \frac{0,455}{5,385} \cdot 100 = 8,44\%$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{1,077}{5,385} \cdot 100 = 20,00\%$$

V našem případě bude do mokrého paliva přidáván odpad z opracování suchého dřeva. Proto při výpočtu kotle budu uvažovat s palivem o obsahu vlhkosti 35%, pro který zde uvádím výsledky výpočtu výhřevnosti a stechiometrie. Vzorce byly použité stejné jako pro výpočet paliva s obsahem vody 53,6%.

- složení v surovém stavu: $C^r = 0,3237 kg / kg$, $H^r = 0,0410 kg / kg$, $S^r = 0,0001 kg / kg$,
 $N^r = 0,0008 kg / kg$, $O^r = 0,2808 kg / kg$

- výhřevnost: $Q_i' = 11,215 \text{ MJ} / \text{kg}$
- teoretické množství kyslíku: $V_{O_2,t} = 0,637 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství teoretického vzduchu: $V_{vz,t} = 3,034 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství teoretického vlhkého vzduchu: $V_{vz,t}^v = 3,092 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství teoretických suchých spalin: $V_{sp,t}^s = 3,002 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství vodní páry v spalinách: $V_{H_2O,t} = 0,952 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství spalin vlhkých teoretických: $V_{sp,t}^v = 3,954 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství skutečného vzduchu suchého: $V_{vz,sk}^s = 2 \cdot 3,034 = 6,068 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství skutečného vzduchu suchého: $V_{vz,sk}^v = 6,183 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství skutečných suchých spalin: $V_{sp,s}^s = 6,035 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- množství skutečných vlhkých spalin: $V_{sp,s}^v = 7,045 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$
- složení vlhkých spalin: percentuální složení vlhkých spalin

$$V_{CO_2} = 0,604 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

$$\omega_{CO_2} = 8,58\%$$

$$V_{SO_2} = 0,000 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

$$\omega_{SO_2} = 0,00\%$$

$$V_{N_2} = 4,797 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

$$\omega_{N_2} = 68,05\%$$

$$V_{O_2} = 0,637 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

$$\omega_{O_2} = 9,04\%$$

$$V_{H_2O} = 1,010 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

$$\omega_{H_2O} = 14,33\%$$

5.1.3 Entalpie vzduchu a spalin

Spaliny považujeme za směs plynu, proto jejich výslednou entalpii musíme vyjádřit jako součet dílčích složek. Entalpie spalin o teplotě t , které vzniknou po spálení 1 kg tuhého paliva s přebytkem vzduchu α , je dán vztahem [10]:

$$I_{sp,s}^{t,\alpha} = I_{sp,t}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{vz,t}^t \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.2)$$

$I_{sp,t}^t$ představuje entalpii stechiometrických spalín a $I_{vz,t}^t$ entalpii minimálního množství vzduchu při teplotě, a určí se [10]:

$$I_{sp,t}^t = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + V_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + V_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t$$

[kJ/kg] (5.3)

$$I_{vz,t}^t = V_{vz,t}^t \cdot i_{vz}^t + V_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t$$

[kJ/kg] (5.4)

V následující tabulce *Tab.5. 1* jsou uvedeny měrné entalpie složek spalín při teplotě t .

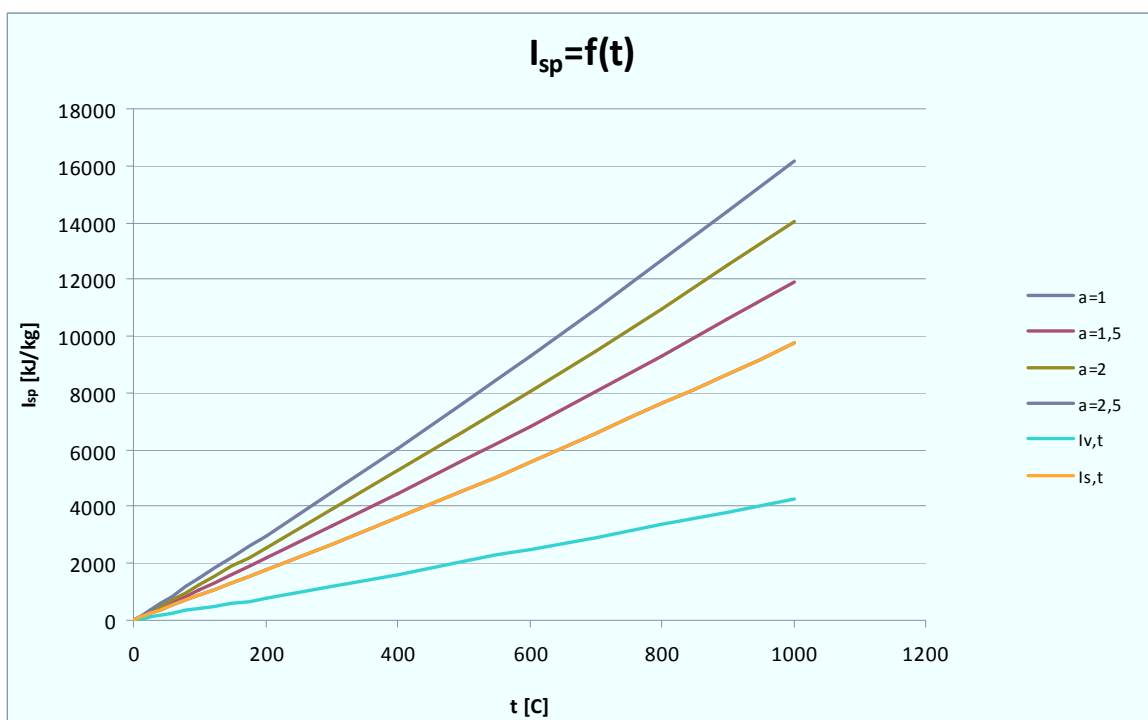
Tab.5. 1 Měrná entalpie složek spalín

$t [^{\circ}\text{C}]$	$i [\text{kJ/m}_N^3]$					$cp_{vz} [\text{kJ.m}_N^{-3}.\text{K}^{-1}]$
	CO_2	SO_2	N_2	H_2O	O_2	
0	0	0	0	0	0	1,282
25	41,62	46,81	32,53	39,1	32,78	1,286
100	170	191,2	129,5	150,6	131,7	1,296
200	357,5	394,1	259,9	304,5	267	1,310
300	558,8	610,4	392,1	462,8	406,8	1,324
400	771,9	836,5	526,7	625,9	550,9	1,337
500	994,4	1070	664	794,5	698,7	1,350
600	1225	1310	804,3	968,8	849,9	1,362
700	1462	1554	947,3	1149	1003	1,374
800	1705	1801	1093	1335	1159	1,385
900	1952	2052	1241	1526	1318	1,397
1000	2203	2304	1392	1723	1477	1,407

Pro zjednodušení práce je výhodné si sestavit I - t diagram spalín, který graficky zachycuje závislost entalpie na teplotě spalín a přebytku vzduchu. Před jeho sestavením je nutné si vytvořit I - t tabulku spalín *Tab.5. 2*. V našem případě nebudeme uvažovat o zastoupení entalpie argonu a popílku, protože se jejich koncentrace blíží k nule.

Tab.5. 2 I-t tabulka spalín

t [°C]	$I_{sp,t}$ [kJ/kg]	$I_{vz,t}$ [kJ/kg]	$I_{sp,s}^{\alpha,t}$ [kJ/kg]			
			1	1,5	2	2,5
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	220,578	99,771	220,578	270,464	320,349	370,235
100	875,611	393,261	875,611	1072,242	1268,872	1465,503
200	1769,444	794,971	1769,444	2166,930	2564,416	2961,901
300	2684,689	1204,767	2684,689	3287,072	3889,456	4491,839
400	3623,416	1622,284	3623,416	4434,558	5245,700	6056,842
500	4586,321	2047,158	4586,321	5609,900	6633,479	7657,058
600	5574,258	2479,026	5574,258	6813,771	8053,283	9292,796
700	6584,963	2917,522	6584,963	8043,724	9502,485	10961,246
800	7618,095	3362,284	7618,095	9299,237	10980,378	12661,520
900	8669,718	3812,946	8669,718	10576,191	12482,664	14389,138
1000	9744,199	4269,146	9744,199	11878,772	14013,345	16147,918



Obr.5. 1 Závislost hodnoty entalpie spalín na teplotě

Pro jednotlivé průběhy entalpie si sestojíme regresní funkce:

$$I_{vz,t}^t = 0,0003532609 \cdot t^2 + 3,9191913820 \cdot t - 0,8893124586 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.5)$$

$$I_{sp,t}^t = 0,0011440171 \cdot t^2 + 8,5999839810 \cdot t + 2,6000211711 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.6)$$

$$I_{sp,s}^{t;1,5} = 0,0013206476 \cdot t^2 + 10,5595796720 \cdot t + 2,1553649418 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.7)$$

$$I_{sp,s}^{t;2} = 0,0014972781 \cdot t^2 + 12,5191753630 \cdot t + 1,7107087125 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.8)$$

$$I_{sp,s}^{t;2,5} = 0,0016739085 \cdot t^2 + 14,4787710540 \cdot t + 1,2660524832 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.9)$$

5.1.4 Fyzikální charakteristiky vzduchu a spalin

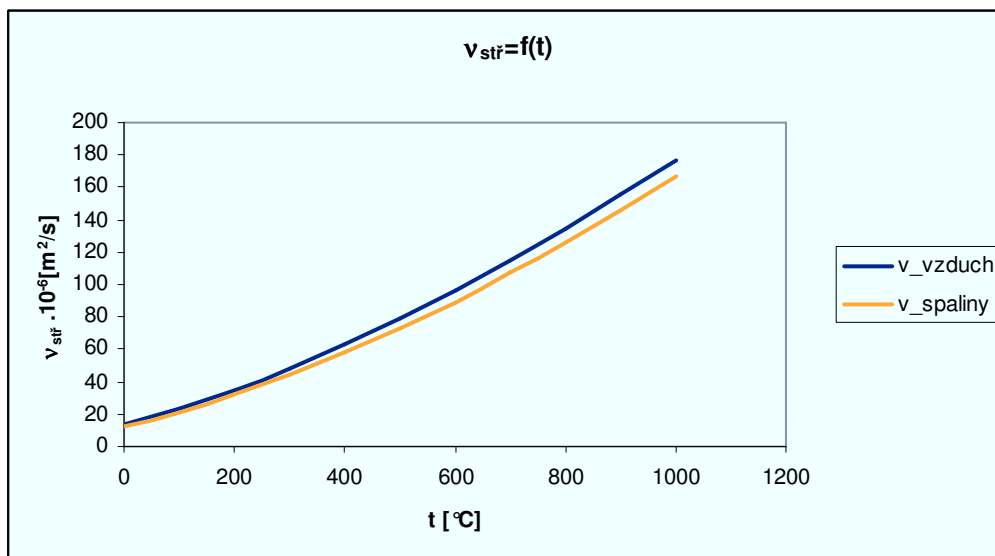
Pro výpočet sdílení tepla je nutné znát fyzikální charakteristiky médií, které se dosazují do kritériálních rovnic. Mezi fyzikální charakteristiky vzduchu a spalin patří kinematická viskozita, součinitel tepelné vodivosti a Prandtlovo číslo.

Fyzikální charakteristiky spalin středního složení po spalování uhlí, které mají poměrové objemy $\phi_{H_2O}=0,11$ a $\phi_{CO_2}=0,13$ jsou uvedeny v Tab.5. 3.

Tab.5. 3 Fyzikální charakteristiky spalin a vzduchu

t [°C]	Vzduch			Spaliny středního složení		
	$10^6 \cdot \nu_{stř} [m^2/s]$	$10^2 \cdot \lambda_{stř} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	$Pr_{stř} [1]$	$10^6 \cdot \nu_{stř} [m^2/s]$	$10^2 \cdot \lambda_{stř} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	$Pr_{stř} [1]$
0	13,2	2,43	0,70	11,9	2,28	0,74
100	23,2	3,19	0,69	20,8	3,19	0,70
200	34,8	3,90	0,69	31,6	4,01	0,67
300	48,2	4,48	0,69	43,9	4,84	0,65
400	62,9	5,05	0,70	57,8	5,70	0,64
500	79,3	5,62	0,70	73,0	6,56	0,62
600	96,7	6,15	0,71	89,4	7,42	0,61
700	115	6,66	0,71	107	8,27	0,60
800	135	7,14	0,72	126	9,15	0,59
900	155	7,61	0,72	146	10,00	0,58
1000	177	8,05	0,72	167	10,90	0,58

Grafické vyjádření fyzikálních charakteristik na teplotě

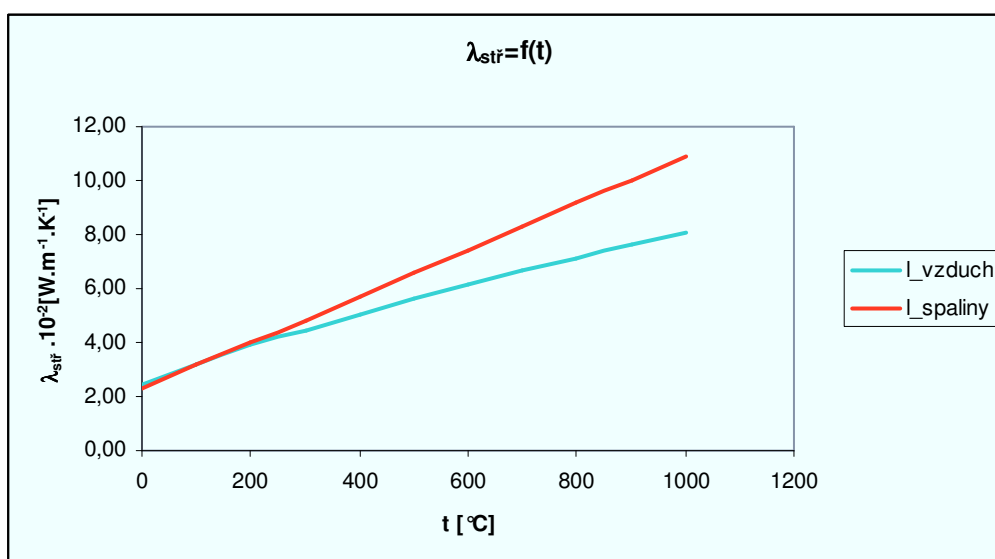


Obr.5. 2 Závislost kinematické viskozity na teplotě

Regresní funkce pro kinematickou viskozitu vzduchu a spalin:

$$v_{stř,vz} = 0,0000633800 \cdot t^2 + 0,1015473193 \cdot t + 12,5251748252 \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (5.10)$$

$$v_{stř,sp} = 0,0000660256 \cdot t^2 + 0,0900925408 \cdot t + 11,3356643357 \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (5.11)$$



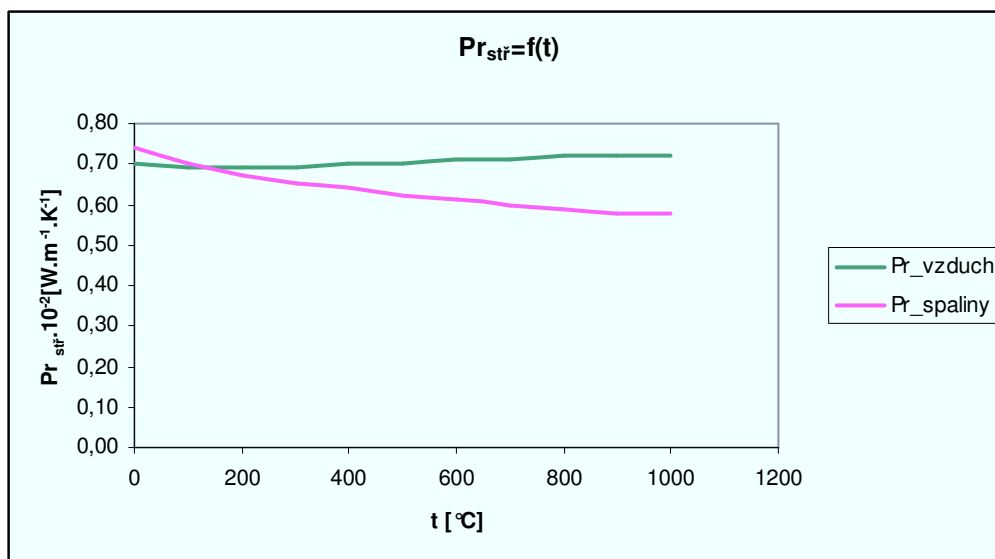
Obr.5.3 Závislost tepelné vodivosti na teplotě

Regresní funkce pro tepelnou vodivost vzduchu a spalin:

$$\lambda_{stř,vz} = -0,0000015012 \cdot t^2 + 0,0070429837 \cdot t + 2,4839160839 \text{ [W/(m.K)]}$$

(5.12)

$$\lambda_{stř,sp} = 0,0000001562 \cdot t^2 + 0,0084201865 \cdot t + 2,3097902098 \quad [\text{W}/(\text{m.K})] \quad (5.13)$$



Obr.5.4 Závislost Prandtlého čísla na teplotě

Regresní funkce pro Prandtlovo číslo vzduchu a spalín:

$$Pr_{stř,vz} = 0,0000000303 \cdot t^2 + 0,0000024242 \cdot t + 0,6927272727 \quad [1] \quad (5.14)$$

$$Pr_{stř,sp} = 0,0000001480 \cdot t^2 - 0,0002980186 \cdot t + 0,7317482517 \quad [1] \quad (5.15)$$

Změnu velikosti těchto charakteristik při spalování jiných paliv způsobuje především změna poměru obsahu vodní páry, proto je jejich velikost nutné vynásobit opravným koeficientem. Jednotlivé opravní koeficienty M se odčítají z nomogramů v Příloze A.

Pak se velikost jednotlivých fyzikálních charakteristik vypočítá podle vztahů [10]:

$$\nu = \nu_{stř} \cdot M_\nu \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5.16)$$

$$\lambda = \lambda_{stř} \cdot M_\lambda \quad [\text{W}/(\text{m.K})] \quad (5.17)$$

$$Pr = Pr_{stř} \cdot M_{Pr} \quad [1] \quad (5.18)$$

5.2 Základní bilance kotle

Účelem základních bilancí kotle je určení účinnosti kotle a spotřeby paliva pro dosažení požadovaného výkonu.

5.2.1 Redukovaná výhřevnost

Pro určení účinnosti je potřebujeme vědět tepelný příkon do kotle, který se vyjádří z redukované výhřevnosti, která je definovaná jako součet měrných tepel vstupujících do soustavy. V našem případě pozůstává z redukované výhřevnosti, fyzického tepla paliva, neboť nedochází k recirkulaci spalin, ani ohřevu vzduchu cizím zdrojem. Pak můžeme redukovanou výhřevnost vyjádřit vztahem [10]:

$$Q_{i,red} = Q_i^r + i_{pv} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.19)$$

kde i_{pv} je fyzické teplo paliva a určí se podle vztahu [10]:

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.20)$$

kde c_{pv} je měrná tepelná kapacita paliva a t_{pv} je teplota paliva. Tepelná kapacita tuhého paliva se určí [10]:

$$c_{pv} = 4,19 \cdot w^r + c_{su} \cdot (1 - w^r) \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (5.21)$$

c_{su} je měrné teplo sušiny, pro dřevo je $1,45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [14]

$$c_{pv} = 4,19 \cdot 0,35 + 1,45 \cdot (1 - 0,35) = 2,409 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Potom redukovaná výhřevnost je:

$$Q_{i,red} = 11215 + 2,409 \cdot 20 = 11263,2 \text{ kJ}/\text{kg}$$

5.2.2 Tepelné ztráty kotle

Při spalování tuhých paliv se uvažuje pět základních tepelných ztrát:

- ztráta mechanickým nedopalem ξ_c
- ztráta chemickým nedopalem ξ_{co}
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí ξ_{sv}
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ξ_f
- ztráta citelným teplem spalin ξ_k

Při spalování dřeva nevzniká mnoho tuhých zbytků, proto ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků a mechanickým nedopalem můžeme zanedbat.

5.2.2.1 Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemickým nedopalem vyjadřuje teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách. Pro její určení se obvykle zjišťuje koncentrace CO ve spalínách. Při návrhu nových zařízení je možné vypočítat její maximální hodnotu pomocí emisního limitu CO. Velikost ztráty chemickým nedopalem lze vypočítat podle přibližného vztahu [10]:

$$\xi_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot V_{sp,t}^s}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_{i,red}} \quad [1] \quad (5.22)$$

kde $mgCO$ [mg/m_N^3] je emisní limit CO, který je pro dřevo $650 \text{ mg}/m_N^3$ a O_{2ref} je referenční obsah kyslíku, který je pro spalování biomasy 11%. Pak ztráta chemickým nedopalem je:

$$\xi_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 650 \cdot 3,002}{(21 - 11) \cdot 11263,2} = 3,666 \cdot 10^{-3}$$

5.2.2.2 Ztráta sáláním a vedením do okolí

Ztráta sáláním a vedením do okolí zohledňuje teplo, které uniká do okolí pláštěm kotle. Závisí na velikosti povrchu a výkonu kotle, izolaci a způsobu oplechování.

Pro náš výpočet volím maximální ztrátu do okolí $\xi_{sv} = 0,02$, tomu je pak přizpůsobená tloušťka navrhované izolace spalovací komory.

5.2.2.3 Ztráta citelným teplem spalín

Ztráta citelným teplem spalín, nebo také komínová ztráta vyjadřuje teplo odcházející z kotle ve spalínách. Vypočte se podle vztahu [10]:

$$\xi_k = (1 - \xi_c) \cdot \frac{I_{sp}^{t_k, \alpha_k} - I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{i,red}} \quad [1] \quad (5.23)$$

kde je od entalpie spalín za kotlem $I_{sp}^{t_k, \alpha_k}$ odpočítaná entalpie spalín při teplotě vzduchu v kotelně $I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}$.

Teplotu spalin za kotlem volím 160 °C, a vztažnou teplotu vzduchu 20 °C. Výpočet entalpii podle regresní funkce (5.8):

$$I_{sp,s}^{20;2} = 0,0014972781 \cdot t_{vz}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{vz} + 1,7107087125$$

$$I_{sp,s}^{20;2} = 0,0014972781 \cdot 20^2 + 12,5191753630 \cdot 20 + 1,7107087125 = 251,7 \text{ kJ/kg}$$

$$I_{sp,s}^{160;2} = 0,0014972781 \cdot t_4^2 + 12,5191753630 \cdot t_4 + 1,7107087125$$

$$I_{sp,s}^{160;2} = 0,0014972781 \cdot 160^2 + 12,5191753630 \cdot 160 + 1,7107087125 = 2043,1 \text{ kJ/kg}$$

pak je komínová ztráta:

$$\xi_k = (1 - 0) \cdot \frac{2043,1 - 251,7}{11263,2} = 0,159$$

5.2.3 Účinnost kotle

Ze známých velikostí tepelných ztrát kotle můžeme vypočítat hrubou účinnost nepřímým způsobem podle vztahu [10]:

$$\eta_k = 1 - \xi_{CO} - \xi_{sv} - \xi_k \quad [1] \quad (5.24)$$

$$\eta_k = 1 - 3,666 \cdot 10^{-3} - 0,02 - 0,159 = 0,817$$

5.2.4 Výrobní teplo vody

Výrobní teplo vody může být také označeno jako celkový tepelný výkon kotle. Potřebný tepelný výkon kotle je určen na základě časového rozložení jednotlivých faz sušení, vytápění a přípravy TUV. Jednotlivé výkony jsou uvedeny v *Tab.5.4*.

Tab.5.4 Dílčí výkony

	Teplo	Čas	Výkon
	kJ	hod	kW
Ohřev	334224	5	18,6
Vlastní sušení	3562321	32,75	30,2
Tepelné ztráty suš.	-	37,75	9,9
TUV	25080	8	0,9
Tepelné ztráty. hala	-	9	14,4

V následující tabulce Tab.5.5 můžeme vidět časové rozložení výkonu. Můžou nastat dva případy. Výkon je potřebný na pokrytí: 1) ohřevu, tepelné ztrát budov a přípravu TUV nebo 2) na vlastní sušení, tepelné ztráty budov a přípravu TUV.

Tab.5.5 Časový harmonogram

Čas [hod]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...
Ohřev dřeva																		
Vlastní sušení																		
Tepelné ztráty sušarna																		
TUV																		
Tep.ztráty hala																		

V prvním případě je potřebný výkon 43,7kW v druhém 55,4kW. Z daných výsledků byl určen **výkon kotle 60kW**.

Z výrobního tepla si můžeme určit množství vyráběné teplé vody:

$$Q_V = m \cdot c_w \cdot (t_1 - t_2)$$

$$m = \frac{Q_V}{c_w \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{60}{4,180 \cdot (90 - 70)} = 0,718 \text{ kg/s}$$

5.2.5 Množství paliva

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle se vypočte podle vztahu [10]:

$$M_{pal} = \frac{Q_V}{Q_{i,red} \cdot \eta_k} \quad [\text{kg/s}] \quad (5.25)$$

Výpočtové množství spáleného paliva se však bere [10]:

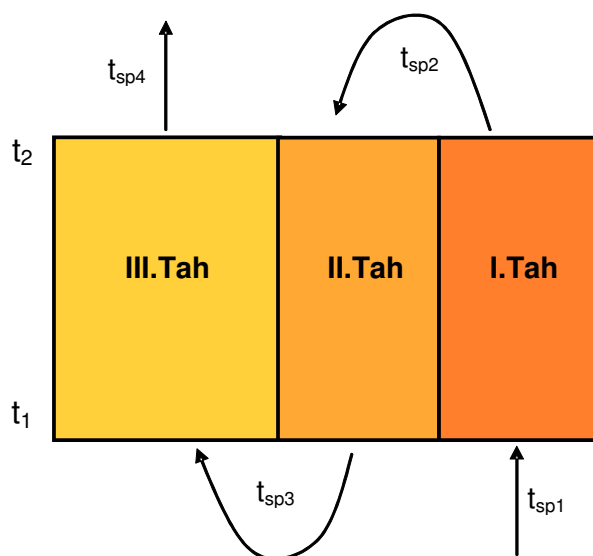
$$M_{pv} = M_{pal} \cdot (1 - \xi_c) \quad [\text{kg/s}] \quad (5.26)$$

Množství paliva pro náš kotel:

$$M_{pv} = \frac{60}{11263,2 \cdot 0,817} \cdot (1 - 0) = 6,520 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

5.3 Bilanční výpočty jednotlivých ploch výměníku tepla

Při bilančních výpočtech ploch je rozdělen celkový tepelný výkon kotle na jednotlivé plochy pro určení teplot spalin a vody. Spalovací komora bude vyrábět spaliny o teplotě t_{sp1} , které vstupují do výměníku, kde předají své teplo vodě. Jedná se o tepelný výměník se žárovými trubkami. Tepelný výkon je rozdělen následovně: I. tah bude mít tepelný výkon 44kW, II. tah 10,5kW a III. 5,5kW. Zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku Obr.5.5 . Podrobné schéma je v Příloze D



Obr.5. 5 Tepelný výměník

5.3.1 Bilanční výpočet pro III. tah

Teplota t_{sp4} je rovná teplotě spalin za kotlem, kterou jsme volili 160 °C. Množství tepla předaného spalinami se musí rovnat teplu přijatému vodou.

$$M_{pv} \cdot (I_{sp3} - I_{sp4}) = Q_{III.Tah}$$

$$I_{sp3} = \frac{Q_{III.Tah}}{M_{pv}} + I_{sp4}$$

$$I_{sp4} = I_{sp,s}^{160;2}$$

$$I_{sp3} = \frac{5,5}{0,00652} + 2043,1 = 2886,7 \text{ kJ / kg}$$

Z entalpie I_{sp3} si můžeme vyjádřit teplotu t_{sp3} , kterou dostaneme řešením kvadratické rovnice (5.8):

$$I_{sp3} = 0,0014972781 \cdot t_{sp3}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp3} + 1,7107087125$$

$$2886,7 = 0,0014972781 \cdot t_{sp3}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp3} + 1,7107087125$$

Výsledná teplota spalin t_{sp3} je 224,4 °C

5.3.2 Bilanční výpočet pro II. tah

$$M_{pv} \cdot (I_{sp2} - I_{sp3}) = Q_{II.Tah}$$

$$I_{sp2} = \frac{Q_{II.Tah}}{M_{pv}} + I_{sp3}$$

$$I_{sp2} = \frac{10,5}{0,00652} + 2886,7 = 4497,1 \text{ kJ / kg}$$

Z entalpie I_{sp2} si můžeme vyjádřit teplotu t_{sp2} , kterou dostaneme řešením kvadratické rovnice (5.8):

$$I_{sp2} = 0,0014972781 \cdot t_{sp2}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp2} + 1,7107087125$$

$$4497,1 = 0,0014972781 \cdot t_{sp2}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp2} + 1,7107087125$$

Výsledná teplota spalin t_{sp2} je 344,9 °C

5.3.3 Bilanční výpočet pro I. tah

$$M_{pv} \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = Q_{I.Tah}$$

$$I_{sp1} = \frac{Q_{I.Tah}}{M_{pv}} + I_{sp2}$$

$$I_{sp1} = \frac{44}{0,00652} + 4497,1 = 11245,6 \text{ kJ / kg}$$

Z entalpie I_{sp2} si můžeme vyjádřit teplotu t_{sp2} , kterou dostaneme řešením kvadratické rovnice (5.8):

$$I_{sp1} = 0,0014972781 \cdot t_{sp1}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp1} + 1,7107087125$$

$$6644,3 = 0,0014972781 \cdot t_{sp1}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{sp1} + 1,7107087125$$

Výsledná teplota spalin t_{sp1} je 818,1 °C

5.3.4 Teplota nechlazeného plamene

Je adiabatická teplota plamene, kterou by dosáhl plamen, pokud by z něho nebylo odváděno teplo. V případě, že nemáme recirkulaci spalin, můžeme psát, že entalpie nechlazeného plamene $I_{np}^{t_{np}, \alpha_{ok}}$, je rovná teplu uvolněnému v ohništi Q_u , které je dané součtem veškerých tepel uvolněných v ohništi z paliva, ze vzduchu [10]:

$$I_{np}^{t_{np}, \alpha_{ok}} = Q_u \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.27)$$

kde Q_u vyjádříme vztahem:

$$Q_u = Q_{i,red} \cdot (1 - \xi_{CO} - \xi_c - \xi_f) + Q_v \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.28)$$

Q_v je teplo přivedené ve vzduchu a je rovno:

$$Q_v = \beta_{vz} \cdot I_{vz}^{t_{vz}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (5.29)$$

kde $I_v^{t_{vz}}$ je entalpie řízeného vzduchu do kotle. V našem případě při teplotě 20 °C. Pak $I_v^{t_{vz}}$ je (5.5):

$$I_{vz}^{20} = 0,0003532609 \cdot t^2 + 3,9191913820 \cdot t - 0,8893124586$$

$$I_{vz}^{20} = 0,0003532609 \cdot 20^2 + 3,9191913820 \cdot 20 - 0,8893124586 = 77,6 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_V = \beta_{vz} \cdot I_{vz}^{20}$$

$$Q_V = 2 \cdot 77,6 = 155,2 \text{ kJ/kg}$$

Teplo uvolněné v ohništi je:

$$Q_u = Q_{i,red} \cdot (1 - \xi_{CO} - \xi_c - \xi_f) + Q_V$$

$$Q_u = 11263,2 \cdot (1 - 3,666 \cdot 10^{-3}) + 155,2 = 11377,1 \text{ kJ/kg}$$

Pak si můžeme vyjádřit teplotu nechlazeného plamene z regresní rovnice (5.8):

$$I_{np}^{t_{np};2} = 0,0014972781 \cdot t_{np}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{np} + 1,7107087125$$

$$11377,1 = 0,0014972781 \cdot t_{np}^2 + 12,5191753630 \cdot t_{np} + 1,7107087125$$

Po vypočtení kvadratické rovnice dostaneme teplotu nechlazeného plamene $t_{np}=826,9^\circ\text{C}$.

V našem případě se jedná o spalovací komoru nechlazenou, proto můžeme počítat jako výstupnou teplotu spalin z kotle teplotu nechlazeného plamene. Po porovnání teploty spalin, která nám vyšla z bilančního výpočtu a teploty nechlazeného plamene dojdeme k tomu, že teplota nechlazeného plamene je větší o 1,07%, tato přesnost je pro náš výpočet postačující, proto nebudeme provádět další iterace. Jako teplotu spalin vstupující do výměníku, budeme brát teplotu z bilančního výpočtu kotle, čili $818,1^\circ\text{C}$.

5.3.5 Výpočet prostupu tepla I. Tah

Pro střední teplotu spalin si určíme fyzikální charakteristiky podle vztahů (5.10)-(5.18):

$$t_{str1} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{818,1 + 344,9}{2} = 581,5^\circ\text{C}$$

$$v_{str,sp1} = 0,0000660256 \cdot t_{str1}^2 + 0,0900925408 \cdot t_{str1} + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp1} = 0,0000660256 \cdot 581,5^2 + 0,0900925408 \cdot 581,5 + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp1} = 86,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\lambda_{str,sp1} = 0,0000001562 \cdot t_{str1}^2 + 0,0084201865 \cdot t_{str1} + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp1} = 0,0000001562 \cdot 581,5^2 + 0,0084201865 \cdot 581,5 + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp1} = 7,26 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\text{Pr}_{str,sp1} = 0,0000001480 \cdot t_{str1}^2 - 0,0002980186 \cdot t_{str1} + 0,7317482517$$

$$\text{Pr}_{str,sp1} = 0,0000001480 \cdot 581,5^2 - 0,0002980186 \cdot 581,5 + 0,7317482517 = 0,608$$

Z nomogramů v Příloze A si určíme opravní koeficienty pro $\omega_{H_2O} = 0,1433$, a $t_{str1} = 581,5^\circ\text{C}$:

$$M_{\nu 1} = 1,01 \Rightarrow \nu_1 = 86,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1,01 = 86,91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$M_{\lambda 1} = 1,02 \Rightarrow \lambda_1 = 7,26 \cdot 10^{-2} \cdot 1,02 = 7,40 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$M_{\text{Pr} 1} = 1,015 \Rightarrow \text{Pr}_1 = 0,608 \cdot 1,015 = 0,618$$

Skutečný objem spalin:

$$V_{sp1} = V_{sp,s}^\nu \cdot M_{pv} \cdot \frac{273 + t_{str1}}{273} = 7,045 \cdot 6,52 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{273 + 581,5}{273} = 0,144 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Pro vyjádření rychlosti potřebujeme vědět průtočný průřez, proto volíme 40 trubek TR48,3x4. Pak pro rychlost platí [10]:

$$w_{sp1} = \frac{V_{sp}}{F_s} = \frac{4 \cdot V_{sp}}{n_{tr1} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,144}{40 \cdot \pi \cdot 0,0403^2} = 2,817 \text{ m} / \text{s}$$

Pro vypočtenou rychlost a rozměrové charakteristiky si vypočteme součinitel konvekce pro jednu trubku [10]:

$$\alpha_{k1} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_1}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp1} \cdot d}{\nu_1} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_1^{0,4} \cdot c_{t1} \cdot c_{l1} \cdot c_{m1} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (5.30)$$

kde c_{t1} je opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny. Při ochlazování spalin nebo vzduchu se volí 1. c_{l1} je opravný koeficient pro poměrnou délku a použije se, je-li $l/d < 50$, a

c_{m1} je opravný koeficient, který se zavádí jen při proudění kanálem, řešeným jako mezikruží.

V našem případě uvažujeme jen o opravním koeficientu c_{i1} , který se určí nomogramu v Příloze A.

$$\alpha_{k1} = 0,023 \cdot \frac{7,40 \cdot 10^{-2}}{0,0403} \cdot \left(\frac{2,816 \cdot 0,0403}{86,91 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,618^{0,4} \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 1 = 11,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

V prvním tahu máme dostatečnou střední teplotu spalin, proto budeme uvažovat o přenosu tepla sáláním [10].

$$\alpha_{sal1} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{str1}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{str1}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{str1}} \right)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (5.31)$$

kde a_{st} je stupeň černosti stěn a při výpočtu se bere $a_{st}=0,8$, a je stupeň černosti spalin při teplotě spalin T_{str} . T_z je teplota povrchu nánosů na straně spalin.

Hodnota a se vypočte podle vztahu [10]:

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad [1] \quad (5.32)$$

$k \cdot p \cdot s$ je optická hustota spalin a určí se podle vztahu [10]:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad [1] \quad (5.33)$$

kde s je efektivní tloušťka sálavé vrstvy a vypočte se podle vztahu [10]:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} \quad [\text{m}] \quad (5.34)$$

kde V je objem a F_{st} je povrch sálajícího prostoru. Pro trubku platí:

$$s = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,0403 = 0,0363 \text{ m}$$

$k_p \cdot \mu_{pk}$ je součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi. $k_s \cdot r_s$ je součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a spočte se podle vztahu [10]:

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,36 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S \quad (5.35)$$

kde r_{H_2O} je objemová koncentrace vodní páry ve spalínách, a t_S je objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách a p_S je celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách a vypočte se [10]:

$$p_S = r_S \cdot p \quad (5.36)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách se vyjádří: [10]:

$$r_S = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (5.37)$$

$$r_{RO_2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{sp,s}^v} = \frac{0,604 + 0}{7,045} = 0,0857$$

Pro naše hodnoty dostaneme:

$$r_S = 0,1433 + 0,0857 = 0,229$$

$$p_S = 0,229 \cdot 0,1 = 0,0229$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1433}{3,16 \cdot \sqrt{0,0229 \cdot 0,0363}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{581,5 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,229 = 17,2$$

V našem případě nebudeme uvažovat o součiniteli zeslabení sálání popílkovým částicemi, pak optická hustota spalín bude:

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = 17,2 \cdot 0,1 \cdot 0,0363 = 0,062$$

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,062} = 0,061$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín se vypočte [10]:

$$t_z = t + \Delta t$$

kde t je střední teplota vody a Δt pro vstupní teplotu spalín $t'_S > 400^\circ\text{C}$ je 60°C [10].

$$t_z = 80 + 60 = 140$$

Pak α sáláním je:

$$\alpha_{sal1} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{str1}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{str1}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{str1}}\right)}$$

$$\alpha_{sal1} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,061 \cdot (273,15 + 581,5)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{273,15 + 140}{273,15 + 581,5}\right)^4}{1 - \left(\frac{273,15 + 140}{273,15 + 581,5}\right)}$$

$$\alpha_{sal1} = 3,54 W / (m^2 \cdot K)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny v I Tahu je:

$$\alpha_{sp1} = \alpha_{k1} + \alpha_{sal1} = 11,49 + 3,54 = 15,03 W / (m^2 \cdot K)$$

Dále pak musíme uvažovat o přestupu tepla před vstupem do trubek. Přestup tepla bude uvažován jen sálání. Vstupní komoru tvoří kvádr o rozměrech 0,310x0,300x0,775m. Při výpočtu nebudeme počítat s přestupem tepla přes přední stěnu, protože jsou v ní umístěna dvířka pro čištění. Spaliny vstupují do výměníku dole, proto bude braná teplota vody pro určení teploty nánosu 70 °C. Hodnotu součinitele sáláním vypočteme podle vztahů (5.31)-(5.37):

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{0,310 \cdot 0,300 \cdot 0,775}{2 \cdot 0,310 \cdot 0,300 + 2 \cdot 0,300 \cdot 0,775 + 2 \cdot 0,310 \cdot 0,775} = 0,064 m$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,36 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1433}{3,16 \cdot \sqrt{0,0229 \cdot 0,064}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{818,1 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,229 = 11,28$$

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = 11,28 \cdot 0,1 \cdot 0,064 = 0,072$$

$$a = 1 - e^{-0,072} = 0,069$$

$$t_z = t + \Delta t$$

Δt pro vstupní teplotu spalin $t'_s > 400^\circ\text{C}$ je 60°C [10].

$$t_z = 70 + 60 = 130$$

Pak α sáláním je:

$$\alpha_{sal,k1} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp1}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp1}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp1}}\right)}$$

$$\alpha_{sal,k1} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,069 \cdot (273,15 + 818,1)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{273,15 + 130}{273,15 + 818,1}\right)^4}{1 - \left(\frac{273,15 + 130}{273,15 + 818,1}\right)}$$

$$\alpha_{sa,k1} = 7,19 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

5.3.6 Výpočet prostupu tepla II. Tah

Pro střední teplotu spalin si určíme fyzikální charakteristiky, dle vztahů (5.10)-(5.18).

$$t_{str2} = \frac{t_{sp2} + t_{sp3}}{2} = \frac{344,9 + 224,4}{2} = 284,6^\circ\text{C}$$

$$\nu_{str,sp2} = 0,0000660256 \cdot t_{str2}^2 + 0,0900925408 \cdot t_{str2} + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp2} = 0,0000660256 \cdot 284,6^2 + 0,0900925408 \cdot 284,6 + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp2} = 42,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\lambda_{str,sp2} = 0,0000001562 \cdot t_{str2}^2 + 0,0084201865 \cdot t_{str2} + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp2} = 0,0000001562 \cdot 284,6^2 + 0,0084201865 \cdot 284,6 + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp2} = 4,72 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$Pr_{str,sp2} = 0,0000001480 \cdot t_{str2}^2 - 0,0002980186 \cdot t_{str2} + 0,7317482517$$

$$Pr_{str,sp2} = 0,0000001480 \cdot 284,6^2 - 0,0002980186 \cdot 284,6 + 0,7317482517 = 0,659$$

Z nomogramů v Příloze A si určíme opravní koeficienty pro $\omega_{H_2O} = 0,1433$, a $t_{str2} = 284,6^\circ\text{C}$:

$$M_{\nu 2} = 1,005 \Rightarrow \nu_2 = 42,33 \cdot 10^{-6} \cdot 1,005 = 42,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$M_{\lambda 2} = 1,015 \Rightarrow \lambda_2 = 4,72 \cdot 10^{-2} \cdot 1,015 = 4,79 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$M_{Pr 2} = 1,015 \Rightarrow Pr_2 = 0,659 \cdot 1,015 = 0,669$$

Skutečný objem spalin

$$V_{sp} = V_{sp,s}^v \cdot M_{pv} \cdot \frac{273 + t_{str2}}{273} = 7,045 \cdot 6,52 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{273 + 284,6}{273} = 0,094 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Pro vyjádření rychlosti potřebujeme vědět průtočný průřez, proto volíme 20 trubek TR48,3x4. Pak pro rychlost platí:

$$w_{sp2} = \frac{V_{sp}}{F_s} = \frac{4 \cdot V_{sp}}{n_{tr2} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,094}{20 \cdot \pi \cdot 0,0403^2} = 3,677 \text{ m} / \text{s}$$

Pro vypočtenou rychlost a rozměrové charakteristiky si vypočteme součinitel konvekce pro jednu trubku.

$$\alpha_{k2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_2}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp2} \cdot d}{\nu_2} \right)^{0,8} \cdot Pr_2^{0,4} \cdot c_{t2} \cdot c_{l2} \cdot c_{m2}$$

$$\alpha_{k2} = 0,023 \cdot \frac{4,79 \cdot 10^{-2}}{0,0403} \cdot \left(\frac{3,677 \cdot 0,0403}{42,54 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,669^{0,4} \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 1 = 16,82 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny v II Tahu je:

$$\alpha_{sp2} = \alpha_{k2} = 16,82 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

I zde budeme uvažovat o přestupu tepla sáláním v komoře 2. Komeru tvoří kvádr o rozměrech 0,590x0,150x0,775m. Při výpočtu nebudeme počítat přestup tepla sáláním pro vrchní stěnu, jelikož není chlazena vodou. Teplota vody pro určení teploty nánosu je 90 °C

jelikož je komora v horní části výměníku. Hodnotu součinitele sálání vypočteme podle vztahů (5.31)-(5.37):

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{0,590 \cdot 0,150 \cdot 0,775}{2 \cdot 0,590 \cdot 0,150 + 2 \cdot 0,150 \cdot 0,775 + 2 \cdot 0,590 \cdot 0,775} = 0,052m$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,36 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1433}{3,16 \cdot \sqrt{0,0229 \cdot 0,052}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{344,9 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,229 = 16,2$$

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = 16,2 \cdot 0,1 \cdot 0,052 = 0,084$$

$$a = 1 - e^{-0,084} = 0,080$$

$$t_z = t + \Delta t$$

Δt pro vstupní teplotu spalin $t'_s < 400^\circ\text{C}$ je 25°C [10].

$$t_z = 90 + 25 = 115$$

Pak α sálání je:

$$\alpha_{sal,k2} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp2}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp2}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp2}} \right)}$$

$$\alpha_{sal,k2} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,080 \cdot (273,15 + 344,9)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{273,15 + 115}{273,15 + 344,9} \right)^4}{1 - \left(\frac{273,15 + 115}{273,15 + 344,9} \right)}$$

$$\alpha_{sal,k2} = 2,21 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

5.3.7 Výpočet prostupu tepla III. Tah

Pro střední teplo tu spalín si určíme fyzikální charakteristiky.

$$t_{str3} = \frac{t_{sp3} + t_{sp4}}{2} = \frac{224,4 + 160}{2} = 192,2^{\circ}\text{C}$$

$$\nu_{str,sp3} = 0,0000660256 \cdot t_{str3}^2 + 0,0900925408 \cdot t_{str3} + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp3} = 0,0000660256 \cdot 192,2^2 + 0,0900925408 \cdot 192,2 + 11,3356643357$$

$$\nu_{str,sp3} = 31,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\lambda_{str,sp3} = 0,0000001562 \cdot t_{str3}^2 + 0,0084201865 \cdot t_{str3} + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp3} = 0,0000001562 \cdot 192,2^2 + 0,0084201865 \cdot 192,2 + 2,3097902098$$

$$\lambda_{str,sp3} = 3,93 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\text{Pr}_{str,sp3} = 0,0000001480 \cdot t_{str3}^2 - 0,0002980186 \cdot t_{str3} + 0,7317482517$$

$$\text{Pr}_{str,sp3} = 0,0000001480 \cdot 192,2^2 - 0,0002980186 \cdot 192,2 + 0,7317482517 = 0,680$$

Z nomogramů v Příloze A si určíme opravní koeficienty pro $\omega_{H_2O} = 0,1433$, a $t_{str1} = 192,2^{\circ}\text{C}$:

$$M_{\nu3} = 1,005 \Rightarrow \nu_3 = 31,09 \cdot 10^{-6} \cdot 1,005 = 31,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$M_{\lambda3} = 1,01 \Rightarrow \lambda_3 = 3,93 \cdot 10^{-2} \cdot 1,015 = 3,97 \cdot 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$M_{Pr3} = 1,015 \Rightarrow \text{Pr}_3 = 0,680 \cdot 1,015 = 0,690$$

Skutečný objem spalín

$$V_{sp3} = V_{sp,s}^v \cdot M_{pv} \cdot \frac{273 + t_{str3}}{273} = 7,045 \cdot 6,52 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{273 + 192,2}{273} = 0,078 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Pro vyjádření rychlosti potřebujeme vědět průtočný průřez, proto volíme 20 trubek TR48,3x4. Pak pro rychlost platí:

$$w_{sp3} = \frac{V_{sp}}{F_s} = \frac{4 \cdot V_{sp}}{n_{tr3} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,078}{20 \cdot \pi \cdot 0,0403^2} = 3,068 \text{ m} / \text{s}$$

Pro vypočtenou rychlost a rozměrové charakteristiky si vypočteme součinitel konvekce pro jednu trubku.

$$\alpha_{k3} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_3}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp3} \cdot d}{\nu_3} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_3^{0,4} \cdot c_{t3} \cdot c_{l3} \cdot c_{m3}$$

$$\alpha_{k3} = 0,023 \cdot \frac{3,97 \cdot 10^{-2}}{0,0403} \cdot \left(\frac{3,068 \cdot 0,0403}{31,25 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,690^{0,4} \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 1 = 15,64 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny v I Tahu je:

$$\alpha_{sp3} = \alpha_{k3} = 15,64 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Komora 3, je poslední komora, u které vypočteme přestup tepla sáláním. Komoru tvoří kvádr o rozměrech 0,530x0,165x0,775m. Při výpočtu nebudeme brát v úvahu přestup tepla přední stěnou, protože jsou v ní umístěny dvířka na čištění, a spodní stěnu protože není chlazená vodou. Hodnotu součinitele sáláním vypočteme podle vztahů (5.31)-(5.37):

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{0,530 \cdot 0,160 \cdot 0,775}{2 \cdot 0,530 \cdot 0,160 + 2 \cdot 0,160 \cdot 0,775 + 2 \cdot 0,530 \cdot 0,775} = 0,054 \text{ m}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,36 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1433}{3,16 \cdot \sqrt{0,0229 \cdot 0,054}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{224,4 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,229 = 16,76$$

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = 16,768 \cdot 0,1 \cdot 0,054 = 0,091$$

$$a = 1 - e^{-0,091} = 0,083$$

$$t_z = t + \Delta t$$

Δt pro vstupní teplotu spalin $t'_s < 400^\circ\text{C}$ je 25°C [10].

$$t_z = 70 + 25 = 95$$

Pak α sáláním je:

$$\alpha_{sal,k3} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp3}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{spr3}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp3}} \right)}$$

$$\alpha_{sal,k3} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,083 \cdot (273,15 + 224,4)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{273,15 + 95}{273,15 + 224,4} \right)^4}{1 - \left(\frac{273,15 + 95}{273,15 + 224,4} \right)}$$

$$\alpha_{sal,k3} = 1,48 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

5.4 Kontrola výkonu kotle

Rychlost vody ve výměníku se blíží k nule, proto nebudeme uvažovat se součinitelem přestupu tepla na straně vody a do výpočtu bude dosazovaná střední teplota vody 80°C .

5.4.1 Teplo předané v I. Tahu a komoře 1

Určíme si tepelný tok pro 1m trubky prvního tahu dle vtahu (5.38), trubky jsou ocelové se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda = 50 \text{ W / (m.K)}$ [11]

$$q_{I.Tah} = \frac{\pi \cdot (t_{str1} - t_w)}{\frac{1}{\alpha_{sp1} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad [\text{W/m}] \quad (5.38)$$

$$q_{I.Tah} = \frac{\pi \cdot (581,5 - 80)}{\frac{1}{14,69 \cdot 0,0403} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln\left(\frac{0,0483}{0,0403}\right)} = 931,8 \text{ W / m}$$

Celkový tepelný výkon předán trubkám 1.tahu:

$$Q_{I.Tah} = n_{tr1} \cdot l_{tr} \cdot q_{I.Tah} = \frac{40 \cdot 1,2 \cdot 931,8}{1000} = 44,73 \text{ kW}$$

Stěny kotle jsou tvořeny plechem o tloušťce 5mm. Jeho součinitel vedení tepla je $\lambda=50W/(m.K)$. Plocha komory 1 je $0,965m^2$. Vzhledem k tomu, že tato komora je v spodní části kotle, je zde teplota vody $70^\circ C$ a teplota vstupujících spali $818,1^\circ C$. Teplo předané v komoře 1 podle vztahů (4.2),(4.3):

$$k_{k1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sal,k1}} + \frac{l}{\lambda_{k1}}}$$

$$k_{k1} = \frac{1}{\frac{1}{7,19} + \frac{0,005}{50}} = 7,19W/(m^2.K)$$

$$Q_{k1} = k_{k1} \cdot S_{k1} \cdot (t_{sp1} - t_1)$$

$$Q_{k1} = \frac{7,19 \cdot 0,965 \cdot (818,1 - 70)}{1000} = 6,08kW$$

5.4.2 Teplo předané v II. Tahu a komoře 2

Určíme si tepelný tok pro 1m trubky druhého tahu dle vtahu (5.38), trubky ocelové se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda=50W/(m.K)$

$$q_{II.Tah} = \frac{\pi \cdot (t_{str2} - t_w)}{\frac{1}{\alpha_{sp2} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

$$q_{II.Tah} = \frac{\pi \cdot (284,6 - 80)}{\frac{1}{16,82 \cdot 0,0403} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln\left(\frac{0,0483}{0,0403}\right)} = 435,2W/m$$

$$Q_{II.Tah} = n_{tr2} \cdot l_{tr} \cdot q_{II.Tah} = \frac{20 \cdot 1,2 \cdot 435,2}{1000} = 10,44kW$$

Plocha komory 2 je $0,757m^2$. Vzhledem k tomu, že tato komora je v horní části kotle, je zde teplota vody $90^\circ C$ a teplota vstupujících spalin $344,9^\circ C$. Teplo předané v komoře 2 podle vztahů (4.2),(4.3):

$$k_{k2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sal,k2}} + \frac{l}{\lambda_{k2}}}$$

$$k_{k2} = \frac{1}{\frac{1}{2,21} + \frac{0,005}{50}} = 2,21 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$Q_{k2} = k_{k2} \cdot S_{k2} \cdot (t_{sp2} - t_2)$$

$$Q_{k2} = \frac{2,21 \cdot 0,757 \cdot (344,9 - 90)}{1000} = 0,75 \text{ kW}$$

5.4.3 Teplo předané v III. Tahu a komoře 3

Určíme si tepelný tok pro 1m trubky třetím tahu dle vtahu (5.38), trubky ocelové se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda=50\text{W/(m.K)}$

$$q_{III.Tah} = \frac{\pi \cdot (t_{str3} - t_w)}{\frac{1}{\alpha_{sp3} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

$$q_{III.Tah} = \frac{\pi \cdot (284,6 - 80)}{\frac{1}{15,64 \cdot 0,0403} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln\left(\frac{0,0483}{0,0403}\right)} = 222,0 \text{ W / m}$$

$$Q_{III.Tah} = n_{tr3} \cdot l_{tr} \cdot q_{III.Tah} = \frac{20 \cdot 1,2 \cdot 222,0}{1000} = 5,33 \text{ kW}$$

Plocha komory 3 je $0,681\text{m}^2$. Vzhledem k tomu, že tato komora je v spodní části kotle, je zde teplota vody 70°C a teplota vstupujících spali $224,4^\circ\text{C}$. Teplo předané v komoře 3

$$k_{k3} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sal,k3}} + \frac{l}{\lambda_{k3}}}$$

$$k_{k3} = \frac{1}{\frac{1}{1,48} + \frac{0,005}{50}} = 1,48 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$Q_{k3} = k_{k3} \cdot S_{k3} \cdot (t_{sp3} - t_1)$$

$$Q_{k3} = \frac{1,48 \cdot 0,681 \cdot (224,4 - 70)}{1000} = 0,29 \text{ kW}$$

5.4.4 Kontrola výkonu kotle

Jde o porovnání bilančního a součtového výkonu kotle. Součtový výkon kotle dostaneme sčítáním dílčích výkonů:

$$Q_{V'} = Q_{I.Tah} + Q_{II.Tah} + Q_{III.Tah} + Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k3}$$

$$Q_{V'} = 40,42 + 10,44 + 5,33 + 6,08 + 0,75 + 0,29 = 63,31kW$$

Rozdíl

$$\frac{Q_V - Q_{V'}}{Q_V} = \frac{60 - 63,31}{60} \cdot 100 = -5,513\%$$

Použita literatura [10], [11]

5.5 Schéma zapojení využití tepla

Schéma zapojení využití tepla se nachází v Příloze E.

Výměník tepla má tepelný výkon 60kW, který je rozdělen na výkon pro technologii sušení 30,2kW, ohřev TUV 0,9kW a výkon pro vytápění pilnice 14,4kW.

Nadbytek výkonu 7 kW se využije v zimním období pro pokrytí zvýšených ztrát provozovny při poklesu teploty pod -15°C.

5.6 Schéma palivo/vzduch

Schéma palivo vzduch se nachází v Příloze F.

Palivo je do kotle dopravováno ze zásobníku štěpky ZŠ pomocí šnekového podavače ŠP. Do spalovací komory, je přiváděn primární vzduch pod rošt pomocí ventilátoru primárního vzduchu. Do komory je také přiváděn sekundární vzduch.

Množství dopravovaného paliva se reguluje podle teploty topné vody. V případě poklesu teploty topné vody dojde k zvětšení počtu otáček. Pomocí počtu otáček jsme schopni vypočítat množství podávaného paliva a tomu přizpůsobit množství spalovacího vzduchu, čili množství vzduchu se bude regulovat podle otáček šnekového podavače.

5.7 Schéma na straně vody

Schéma na straně vody se nachází v Příloze G.

Tepelný výměník produkuje vodu o teplotě 90 °C. Voda vstupuje do čtyřcestné armatury, která ji rozděluje do dvou okruhů. První malý okruh zabezpečuje, aby teplota vratné vody do výměníku nepodkročila teplotu 70 °C, čím se předchází kondenzaci vody ve spalínách na plochách a tím jejich korozi a vznikání nánosu. V druhém okruhu voda vstupuje do rozdělovače, odkud je rozváděná do jednotlivých okruhů – sušárny, TUV, topení haly.

Jednotlivé dílčí okruhy mají teplotní čidla, pomocí kterých se reguluje třícestná směšovací armatura, pomocí které se dosáhne požadovaná teplota vstupní vody do spotřebiče. Voda z jednotlivých okruhů vstupuje do sběrače, odkud se vrací spět do výměníku.

Výměník je opatřen chladicí smyčkou, která se otevře termostatickým ventilem nezávislým na zdroji elektrické energie při překročení maximální přípustné teploty vody ve výměníku.

6 Závěr

Výsledkem mojí diplomové práce je koncepční návrh kotle a sušárny. Pro výpočet potřebného výkonu kotle byly provedeny výpočty spotřeby tepla pro jednotlivé spotřebiče. Navrhovaný kotel bude teplovodní s výkonem 60kW, a bude vyrábět vodu o teplotě 90 °C pro technologii sušení, přípravu TUV a vytápění haly. Jako palivo budou používány piliny z pořezu surového dřeva, z opracování sušeného dřeva a štěpka. Vlhkost paliva se bude pohybovat v rozmezí 10-50%. Sušárna je určená pro sušení 5m³ řeziva klasickým způsobem.

Na základě těchto návrhů, kde jsou všechny základní rozměry kotle a sušárny se vypracuje výrobně-technická dokumentace, ve které se musí navrhnout vhodné materiály pro výměník tepla a pro vyzdívku spalovací komory s detailním návrhem spalovacího roštu. U sušárny je nutné navrhnout hlavní nosnou konstrukci s provedením statického výpočtu této konstrukce a zavážecího vozíku. Toto nebylo předmětem mojí práce. Taktéž jsem neřešila rozvody mezi kotlem a jednotlivými spotřebiči tepla. V práci uvádím jenom výrobu tepla a spotřebu tepla v jednotlivých spotřebičích, co je základním projekčním podkladem pro dopracování rozvodného potrubí. V době zpracování mé práce nebylo určené umístění sušárny a kotelny v areálu provozovny pily.

Poděkování

Rada bych poděkovala doc. Ing Ladislavu Vilimvcovi za odborné vedení diplomové práce, cenné rady, připomínky, trpělivost a příjemnou spolupráci.

Dále děkuji své rodině za podporu při studiu.

Literatura

- [1] Trebula, P.:Hydrotermická úprava a ochrana dřeva, část „Hydrotermická úprava dřeva“, Vysoká škola lesnická a dřevářská,1989, 301s, ISBN 80-228-0054-6
- [2] Wood handbook- Wood as an engineering material,Forest Products Laboratory, 1999, 463s
- [3] Jandačka, J., Malcho, M.: Biomasa jako zdroj energie, 2007, 78s, ISBN 978-80-969161-4-6
- [4] Ochrana, L., Skála, Z., Slezák, P. Provozní problémy při spalování biomasy., Efektivní energetika VI, VŠB-TU Ostrava, 2005. s. 90-99. ISBN: 80-248-0793-9.
- [5] Stiořová, K.:Výzkum spalování dřeva v ohništích malých výkonů, Sborník mezinárodní konference Spalování a životní, VŠB TU-Ostrava, 2003, str. 206-213. ISBN 80-248-0394-1
- [6] Slouka, P.: Výpočet výhřevnosti biomasy na základě analytického rozboru, Energetika 12/96, 401-404s
- [7] Bernasovský, J.: Metody hodnocení vhodnosti a výtěžnosti OZE pro účely energetických bilancí a energetické statistiky a pro účely regionálního územního plánování a energetických generelů, EkoWATT, 2000, 132s
- [8] ČSN P CEN/TS 14961, Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv, 2005
- [9] Dzurenda, L.: Vplyv optimalizácie procesu spaľovania dreva z hľadiska ekológie na tepelnú účinnosť kotla výzkum, Sborník mezinárodní konference Spalování a životní , VŠB TU-Ostrava, 2003, str. 74-79. ISBN 80-248-0394-1
- [10] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, 2. vyd., ČVUT Praha, 2002, 212s, ISBN 80-01-02591-8
- [11] Kadlec, Z.: Sdílení tepla: návody do cvičení, 2. vyd., VŠB TU-Ostrava, 2006, 79s
- [12] Kaminský, J., Vrtek, M.: Obnovitelné a alternativní zdroje energie, interní učební texty, VŠB TU-Ostrava, 2002, 141s
- [13] Dřevošrot, a. s, Dřevní biomasa, [2011-02-06], dostupné na:
<<http://www.drevosrot.cz/stranka-drevni-biomasa-27>>
- [14] Ústav nauky o dřevě - Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, [2011-02-16], dostupné na: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/49>>

Seznam příloh

Příloha A	Opravné koeficienty pro přepočet fyzikálních charakteristik spalin středního složení	
Příloha B	A3-03-2011	Kotel biomasa 60kW
Příloha C	A3-02-2011	Spalovací komora 60kW
Příloha D	A3-01-2011	Výměník tepla 60kW
Příloha E	A3-06-2011	Schéma zapojení využití tepla
Příloha F	A3-05-2011	Schéma palivo vzduch
Příloha G	A3-04-2011	Schéma na straně vody
Příloha H	A3-07-2011	Sušárna